



industriales
etsii

**Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial**

**Evaluación experimental de la mejora en el
almacenamiento de energía solar con
materiales PCM mediante modificaciones en el
diseño de los intercambiadores de calor en
condiciones de irradiancia baja y media.**

TRABAJO FIN DE ESTUDIOS

GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL

Autor: Laura Muñoz García

Directores: García Pinar, Alberto

Egea Villarreal, Alberto

Cartagena, julio de 2021



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

Índice

Índice	I
Índice de figuras	III
Índice de tablas	V
Nomenclatura.....	VI
Resumen.....	VIII
Abstract	VIII
1. Introducción	1
1.1. Necesidad	1
1.2. Estado del arte	3
1.2.1 Estudios anteriores realizados por el grupo de investigación.....	3
1.2.3. Bibliografía especializada	8
2. Descripción de la instalación	13
2.1. Instalación solar térmica	14
2.1.1. Colectores solares térmicos	14
2.1.2. Equipo de bombeo	15
2.1.3. Enfriadora y depósito	15
2.1.4. Equipo hidráulico.....	16
2.1.5. Instrumentación presente en la instalación.....	16
2.2. Sistemas de acumulación	18
2.3. Material de cambio de fase.....	20
2.4. Medidas de temperatura	21
2.4.1. Temperatura de la pared	21
2.4.2. Temperatura de la parafina	22
2.4.3. Temperatura del agua	23
2.5. Sistema de adquisición de datos.....	23

2.6.	Mejoras en el Sistema	24
3.	Metodología de los ensayos.....	27
3.1.	Mejora en el procesado de datos.....	29
4.	Parámetros de estudio	31
4.1.	Irradiancia.....	31
4.2.	Temperaturas	31
4.3.	Transferencia de calor.....	33
4.4.	Energía almacenada y fracción líquida.....	33
4.5.	Números adimensionales.....	34
5.	Eficiencia	35
6.	Ensayos.....	43
7.	Comparaciones.....	45
7.1.	Caso 1	45
7.2.	Caso 2	54
7.3.	Caso 3	55
7.4.	Resultados eficiencia.....	56
8.	Estudio de los beneficios de superficies aleteadas en LTES.....	59
9.	Conclusiones.....	65
10.	Bibliografía	69

Índice de figuras

Figura 1. Desacoplamiento entre producción y consumo de la energía solar [2].	2
Figura 2. Control remoto de la instalación desarrollado en [3]	4
Figura 3. Primeros resultados de Energía almacenada en el acumulador de carcasa y tubo tipo liso. [3]	4
<i>Figura 4. Resultados de la fracción líquida pertenecientes a acumulador liso.</i> [12]	5
Figura 5. Comparación de la fracción líquida de acumuladores liso y aleteado. [12]	6
Figura 6. Relación entre número de Nusselt y número de Fourier. [13]	7
Figura 7. Datos de fracción líquida de distintos ensayos. [4]	7
Figura 8. Fracción líquida y energía almacenada. [14]	7
Figura 9. Variación transitoria de temperatura en la salida de LHTES y la fracción de fusión. [29]	9
Figura 10. Variación en la tasa de carga y la capacidad de carga [31]	9
Figura 11. Variaciones de temperaturas del PCM en cuatro unidades diferentes [31]	10
Figura 12. Multi-tanque PCM en cascada con sistema SWC. [33]	10
Figura 13. Variación de la productividad horaria con aletas huecas cuadradas / circulares y convencional.	11
Figura 14. Esquema de la instalación actual	13
Figura 15. Colectores tubo vacío	15
Figura 16. Enfriadora y depósito	16
Figura 17 Caudalímetro Coriolis	17
Figura 18. Piranómetro	17
Figura 19. Plano acumulador liso. Diseño propiedad de SACOME	19
Figura 20. Plano del acumulador aleteado. Diseño propiedad de SACOME	20
Figura 21. Disposición de los tubos instrumentados en el acumulador	22
Figura 22. Varilla dañada extraída (derecha) y detalle de varilla (izquierda)	22
Figura 23. Disposición de las sondas y posición de los termopares del acumulador aleteado ..	23
Figura 24. Disposición de las sondas y posición de los termopares del acumulador liso	23
Figura 25. Elementos de adquisición y control. Fuente: Antonio Zamora [11]	24
Figura 26. Antes y después de la instalación	25

Figura 27. Programa Labview	27
Figura 28. Programa DRM software	29
Figura 29. Posiciones horizontal y vertical	32
Figura 30. Distribución de termopares en la pared de acumular liso y aleteado.	32
Figura 31. Disposición de los tubos del serpentín.....	33
Figura 32. Esquema de la instalación	35
Figura 33. Esquema cuatro colectores activados.....	36
Figura 34. Esquema dos colectores activados.....	37
Figura 35. Esquema tres colectores activados	38
Figura 36. Curva de irradiancia día 11/05/2021.....	45
Figura 37. Curva de irradiancia día 23/04/2021.....	46
Figura 38. Curva de fracción líquida día 11/05/2021.....	47
Figura 39. Curva fracción líquida 23/04/2021.....	47
Figura 40. Curva energía almacenada día 11/05/2021	48
Figura 41. Curva energía almacenada día 23/04/2021	49
Figura 42. Curva de calor 11/05/2021	50
Figura 43. Curva de calor 23/04/2021	50
Figura 44. Calor por unidad de superficie 11/05/2021	51
Figura 45. Calor por unidad de superficie 23/04/2021	51
Figura 46. Curvas coeficiente de convección día 11/05/2021	52
Figura 47. Representación gráfica de Nusselt 11/05/2021.....	53
Figura 48. Representación gráfica del número de Rayleigh.....	53
Figura 49. Calor colectores días soleados	54
Figura 50. Calor disponible día 23/03/2021.....	55
Figura 51. Rendimiento	57

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades de los colectores solares térmicos	14
Tabla 2. Especificaciones propiedades piranómetro modelo GEO-SR20 [36].	18
Tabla 3. Especificaciones del RUBITHERM RT70HC.....	20
Tabla 4. Cálculo de caudal para cuatro colectores activados	37
Tabla 5. Cálculo de caudal para dos colectores activados	37
Tabla 6. Cálculo de caudal para tres colectores activados.....	38
Tabla 7. Ensayos	43
Tabla 8. Valores mensuales de calor disponible y rendimientos liso y aleteado	56
Tabla 9. Área requerida para acumular liso y aleteado	60
Tabla 10. Número de colectores para acumulador liso y aleteado	61
Tabla 11. Número de tubos vacíos para superficie de absorción de 1,51 m ² de colector.....	62
Tabla 12. Número de colectores para superficie absorción de 1,25 m ²	62
Tabla 13. Resultados Energía utilizada.....	63

Nomenclatura

α	Factor de conversión
β	Coefficiente de expansión térmica
η	Rendimiento
ν	Viscosidad cinemática
C_p	Calor específico
D	Diámetro exterior del acumulador
g	Aceleración de la gravedad
h	coeficiente de película
H	Entalpía de cambio de fase
k	Conductividad térmica del PCM
m	Masa
Q	Calor
T	Temperatura

Abreviaciones

CTSPCM	Almacenamiento de PCM en cascada
GEI	Gases de efecto invernadero
LHS	Almacenamiento de calor latente
PCM	Material de cambio de fase
SHS	Almacenamiento de calor sensible
SWC	Colectores solares de agua
TES	Almacenamiento de energía térmica
THS	Almacenamiento de calor termo-químico

Subíndice

Ct	Colectores
<i>disp</i>	Disponible
l	Estado líquido
<i>m</i>	Gasto másico
m	masa del PCM
P1	Tramo de la instalación desde la salida de los colectores hasta entrada de los acumuladores.
P2	Tramo de la instalación desde la salida de los acumuladores hasta entrada de los colectores
s	Estado sólido
W	Pared de los acumuladores

Resumen

Este Trabajo Final de Estudios abarca una serie de ensayos realizados con diferentes números de colectores, acumuladores y condiciones climatológicas. Además de la captura de datos y procesado de estos experimentos, que permiten la comparación y el estudio de diferentes parámetros obtenidos, como se verá durante el desarrollo de este documento.

Uno de los objetivos de este proyecto, consiste en la valoración experimental del uso de aletas para aumentar la transferencia de calor. Para ello, se compara con un acumulador liso y se estudian distintas variables como la fracción líquida y la eficiencia. También, se incluye un estudio de viabilidad económica para ambos acumuladores, en el que se obtiene una instalación compatible para todos los meses y se reflejan los beneficios del acumulador aleteado.

Este Trabajo Final de Estudios continúa una línea de investigación perteneciente al Departamento De Ingeniería Térmica y Fluidos relacionada con la recuperación de energía mediante materiales de cambio de fase empleando unos intercambiadores de calor como acumuladores.

Abstract

This Final Degree's Project includes a series of tests carried out with different numbers of solar collectors, accumulators and weather conditions. As well as, the data collection and processing them that allow the comparison and studies of different parameters obtained, as will be seen during the development of this document.

One of the main objectives, is the observation of the experimental assessment of the use of fins to increase heat transfer. For this purpose, it is compared with a smooth shell-tube accumulator and different variable as the liquid fraction and efficiency. Also, an economic viability study for both accumulators, in which a compatible installation is obtained for all the year and the benefits of the finned accumulator are demonstrated.

This Final Degree's Project continues the line of research belonging to the Department of thermal and Fluid Engineering related to energy recovery through phase change materials using heat exchangers as accumulators.

1. Introducción

1.1. Necesidad

En las últimas décadas, se ha incrementado la promoción del almacenamiento de energía térmica (TES) y las tecnologías de energía sostenible. Además, este movimiento se ha visto influenciado gracias al objetivo que propuso Europa, conocido como el objetivo 20/20/20, en el cual, la Unión Europea se comprometía a:

- Reducir un 20% las emisiones de gases de efectos invernadero (GEI) respecto a las emisiones de 1990.
- Promover las energías renovables un 20%.
- Obtener un 20% del consumo energético a partir de fuentes renovable.

En septiembre de 2020, se propuso por parte de la Comisión aumentar el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, incluidas las emisiones y absorciones al menos al 55% en 1990 para 2030.

Los objetivos clave para 2030 se establecieron de la siguiente manera:

- Reducir al menos un 40% las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a las emisiones producidas a 1990.
- Mejorar un 32,5% la eficiencia energética
- Poseer un 32% de cuota de energías renovables

Mediante estos objetivos se espera ser el primer continente climáticamente neutro en 2050 según la información extraída de Comisión Europea [1].

Uno de los aspectos necesarios para cumplir estos objetivos, son la necesidad del desarrollo sostenible, así como, el fomento de la utilización de energías renovables. En especial, la energía solar, energía hidráulica, energía eólica, energía de biomasa entre otras, con el fin de aliviar la contaminación medioambiental. Sin embargo, dichas energías poseen la desventaja de no conservar una continuidad en el período de generación.

La energía térmica es un ejemplo de estas desventajas, dado que el suministro que se transfiere abarca un periodo de tiempo, además, de no ser continuo. Esto provoca una brecha entre la oferta y la demanda de energía en tiempo como se muestra en la Figura 1

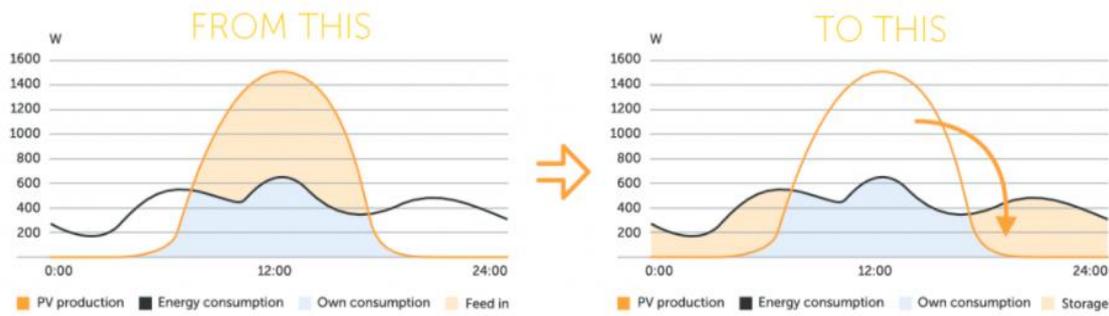


Figura 1. Desacoplamiento entre producción y consumo de la energía solar [2].

Como solución a este suceso, se ha investigado acerca de diferentes tecnologías de almacenamiento de energía térmica (TES), como el almacenamiento de calor sensible (SHS, Sensible Heat Storage), almacenamiento de calor latente (LHS, Latent Heat Storage) y almacenamiento de energía termo-químicos (THS, Thermochemical Heat Storage).

- El almacenamiento de calor sensible (SHS, Sensible Heat Storage) consiste en el almacenamiento de energía térmica calentando un sólido o líquido, sin que este material cambie de fase. La ecuación que rige el potencial SHS se muestra en la ecuación 1.

$$Q = m \int_{T_L}^{T_H} C_p dT = m C_p (T_H - T_L) \text{ cuando } C_p \sim \text{constante} \quad (\text{ec. 1})$$

Donde Q es el calor, m es la masa del material de almacenamiento, C_p es el calor específico a presión constante de los materiales SHS, T_H y T_L son las temperaturas altas y bajas de uso de SHS.

- El almacenamiento de calor latente (LHS, Latent Heat Storage) emplea el calor absorbido o liberado cuando el material sufre un cambio de fase entre líquido y gas o entre sólido y líquido. La cantidad de calor para este tipo de almacenamiento se obtiene mediante la ecuación 2.

$$Q = m \int_{T_L}^{T_m} C_{ps} dT + m \Delta H_m + m \int_{T_m}^{T_H} C_{pl} dT \quad (\text{ec. 2})$$

Donde T_m es el punto de fusión del PCM, C_{ps} y C_{pl} corresponde al calor específico del PCM en estado sólido y líquido respectivamente y ΔH_m , se trata de la entalpía de cambio de fase.

- El almacenamiento termoquímico (THS, Thermochemical Heat Storage) consigue el calor absorbido y liberado a partir de una reacción química reversible. Este fenómeno se rige con la ecuación 3:

$$Q = m \alpha \Delta H_r \text{ con } \alpha \leq 1 \quad (\text{ec. 3})$$

Donde m es la cantidad de material de almacenamiento, α es la conversión y ΔH_r es el calor endotérmico de la reacción.

Capítulo 1. Introducción

Además de la información obtenida del artículo científico realizado por Zhang et al [3], se puede encontrar una explicación más detallada sobre los tres tipos de almacenamiento comentados en el TFM de Alberto Egea [4].

El almacenamiento de la energía térmica se realiza mediante el empleo de materiales de cambio de fase (PCM), que se caracteriza por su gran capacidad de almacenamiento de energía térmica. Los PCMs se pueden clasificar dependiendo de su composición, se encuentra el PCM orgánico, PCM inorgánico y PCM eutéctico [5]. En general, se describe por su versatilidad, donde se puede utilizar en vehículos [6], edificios [7], industrias... Se contribuye al confort térmico interior mediante la estabilización de la temperatura ambiente, ahorro energético y económico en la utilización de PCM integrados en edificios [8].

En los sistemas LHS, se describe, generalmente, como un intercambiador de calor donde el fluido que transmite el calor (HTF, Heat Transfer Fluid) intercambia energía térmica con un medio de almacenamiento (PCM, Phase Change Material). Durante el proceso de carga, se cede calor del HTF al PCM, y durante el proceso de descarga se cede calor del PCM al HTF. De esta manera, se desarrollan ambos procesos a relativamente baja temperatura, con elevado rendimiento y fiabilidad.

Sin embargo, estos sistemas se caracterizan por su desventaja debido a que la mayor parte de los materiales de cambio de fase se describen con una conductividad térmica muy baja, por lo que, los tiempos de carga y descarga suelen ser relativamente altos. Para paliar esta desventaja, los acumuladores se diseñan incorporando diferentes técnicas de mejora de la transferencia de calor.

1.2. Estado del arte

El estudio bibliográfico realizado en esta memoria está compuesto una serie de artículos científicos sobre la adición de aletas y métodos de mejora de la conductividad de la parafina. A su vez, un análisis de trabajos desarrollados desde el comienzo de la instalación por el grupo de investigación del Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos.

1.2.1 Estudios anteriores realizados por el grupo de investigación

La primera investigación de esta línea de investigación fue realizada por David Alexander [9] cuyo trabajo fin de estudio consistió en el estudio de materiales de cambio de fase que pudieran usarse para el almacenamiento de energía solar térmica latente, así como, la toxicidad de estos. David centró su estudio en la parafina RT70HC y, pudo obtener correlaciones experimentales que modelan el comportamiento del material en función de la temperatura.

Más tarde, Mario Belmonte [10] y Antonio Zamora [11] estudiaron y desarrollaron en sus TFEs la construcción de la instalación para dos sistemas de acumulación distintos. Además, Antonio Zamora [11] emprendió la instrumentación y conexiones eléctricas constituyentes a la instalación, así como, la programación de dicha instalación con la que pudo extraer los primeros resultados del acumuladores de carcasa tubo tipo liso (Figura 3).

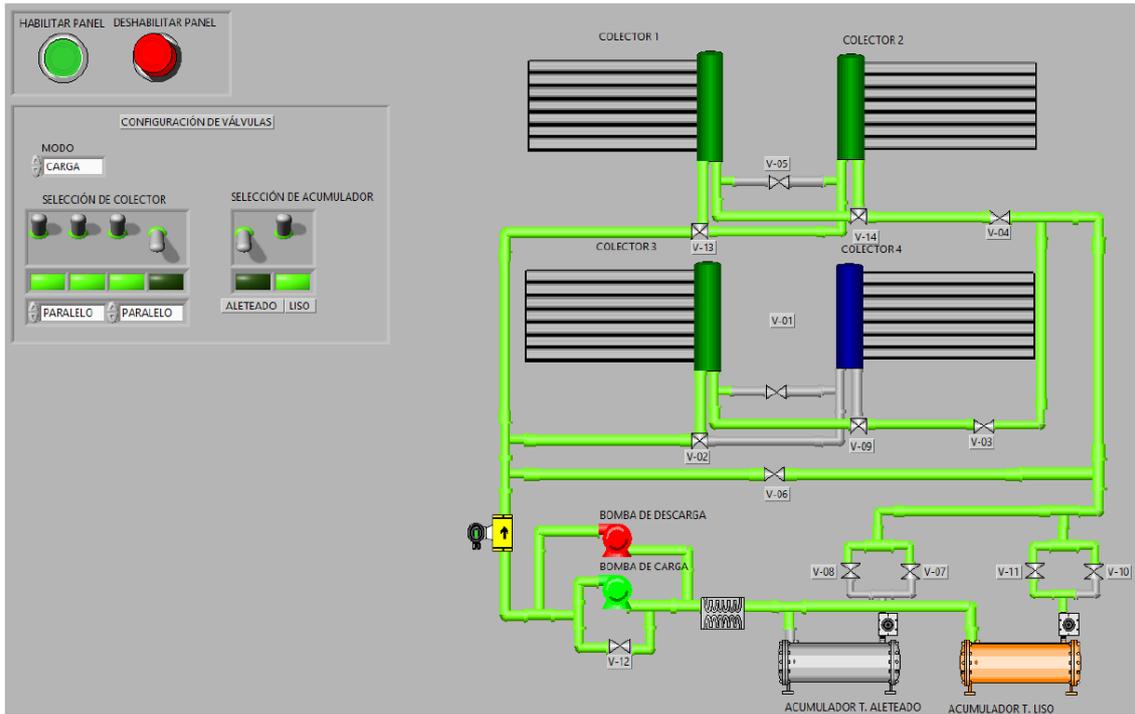


Figura 2. Control remoto de la instalación desarrollado en [3]

A partir de este programa, se ha podido añadir nuevos dispositivos como bombas reconfigurando la instalación de la Figura 2.

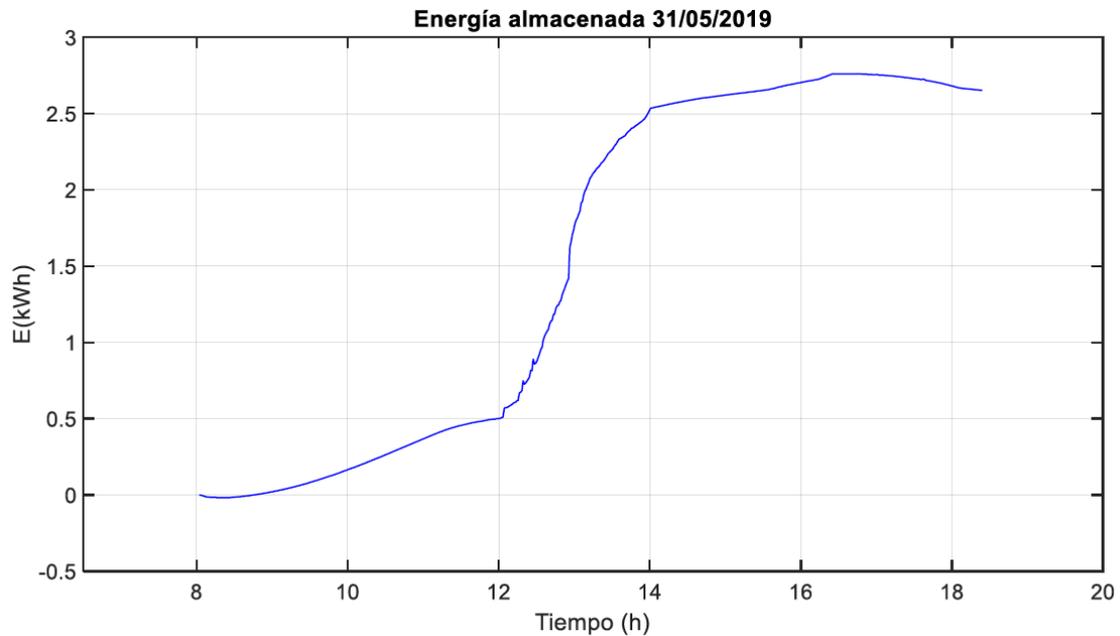


Figura 3. Primeros resultados de Energía almacenada en el acumulador de carcasa y tubo tipo liso. [3]

Francisco García Bermejo desarrolló su TFM [12] en la adquisición de resultados en el campo de la simulación numérica para un estudio más exacto de la fracción líquida del acumulador liso. Además, realizó una comparación de los resultados obtenidos de forma numérica y

Capítulo 1. Introducción

experimentalmente, empleando distinto número de colectores y la estación de invierno y verano.

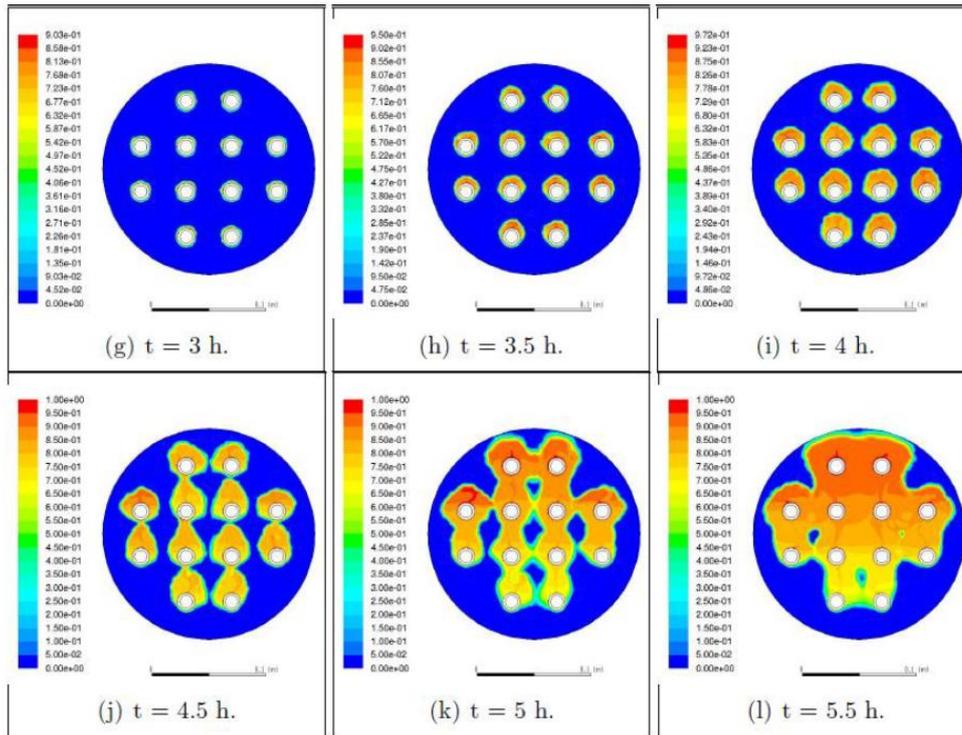


Figura 4. Resultados de la fracción líquida pertenecientes a acumulador liso. [12]

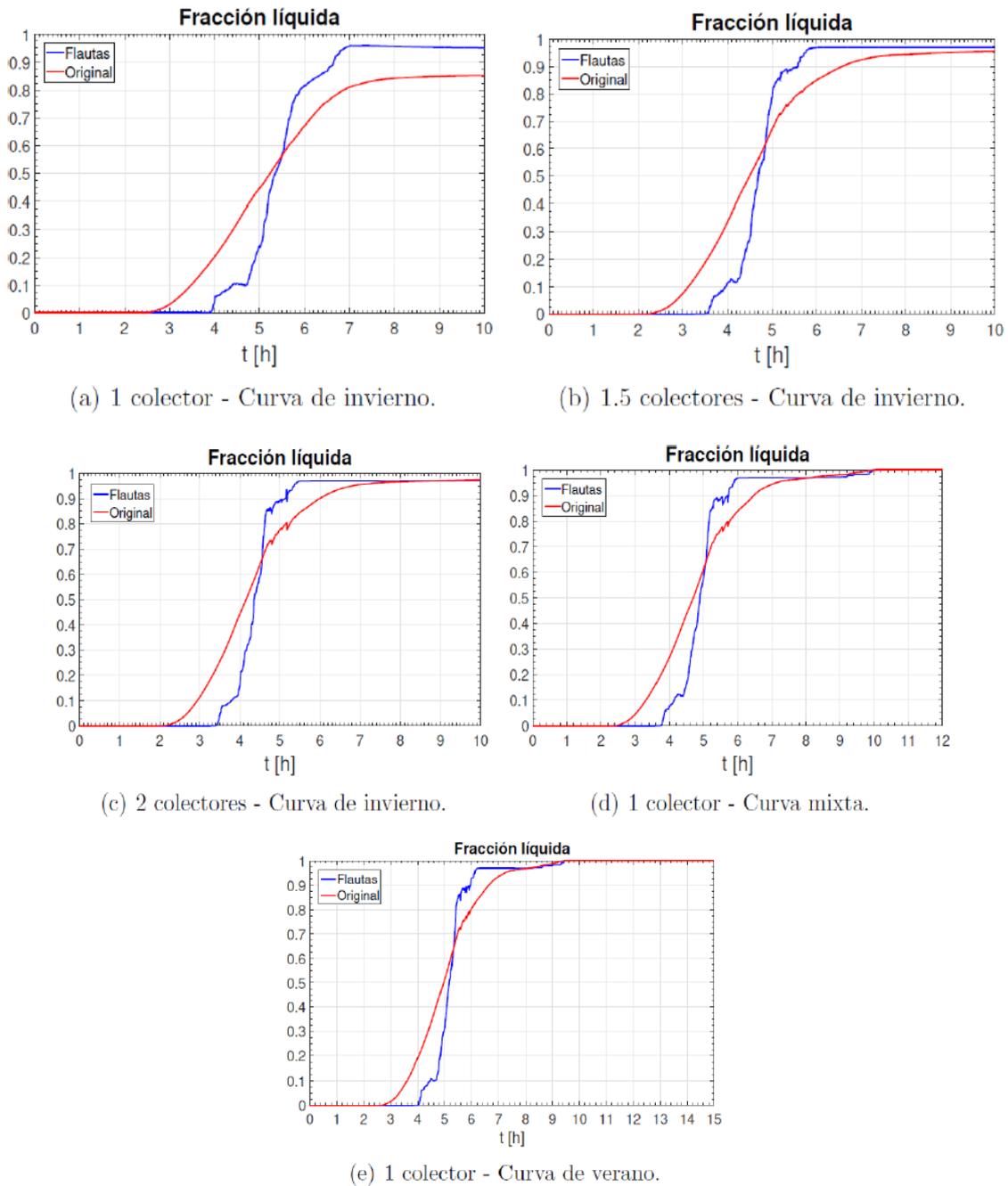


Figura 5. Comparación de la fracción líquida de acumuladores liso y aleteado. [12]

En 2020, Domingo Fernández Esquivá [13] realizó un estudio experimental de los mecanismos de transferencia de calor durante la fusión del PCM centrado en el acumulador liso que dispone la instalación. Complementariamente, estudió las relaciones entre números adimensionales durante el proceso de fusión del PCM.

Estableció una relación entre el número de Nusselt y el de Fourier, como se puede observar en la Figura 6. Observó que todos los ensayos siguen la misma tendencia y se podría modelar con una ecuación. Los coeficientes de dicha ecuación varían según el número de colectores funcionando en cada ensayo.

Capítulo 1. Introducción

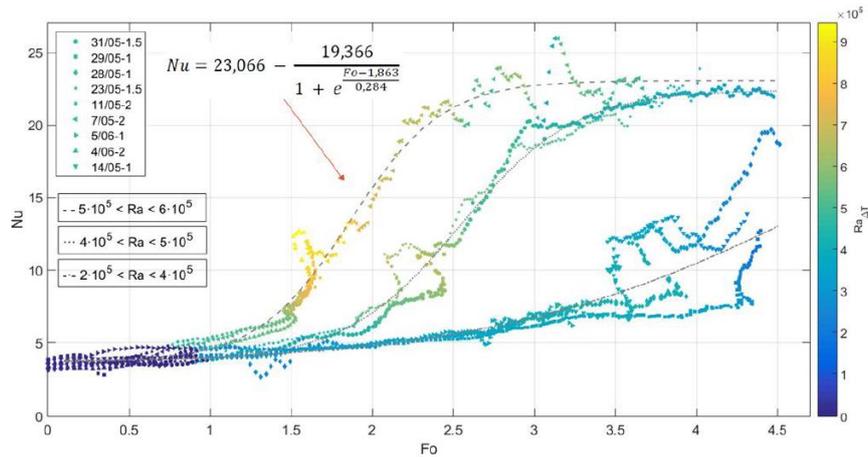


Figura 6. Relación entre número de Nusselt y número de Fourier. [13]

Alberto Egea Villareal [4] realizó el diseño de un nuevo sistema de almacenamiento de energía térmica latente mediante espumas metálicas y lo implementó en la instalación. Comprobó que la presencia de espumas aumenta significativamente la velocidad de fusión del PCM a partir de la obtención de resultados y, que la utilización de dos o tres colectores en un ensayo puede adelantar dos horas la fusión del PCM.

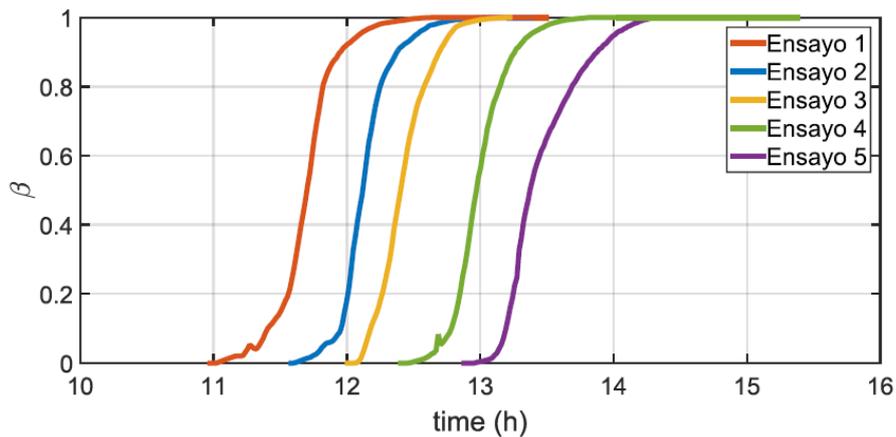


Figura 7. Datos de fracción líquida de distintos ensayos. [4]

Por último, Víctor Lorente [14] realizó ensayos en la estación de verano y estudió el comportamiento de ambos acumuladores mediante comparativas. Pudo observar que bajo condiciones ideales de verano el acumulador liso y aleteado se asemejan, en cambio, en condiciones desfavorables demostró una eficiencia de 44,22% a favor del acumulador aleteado.

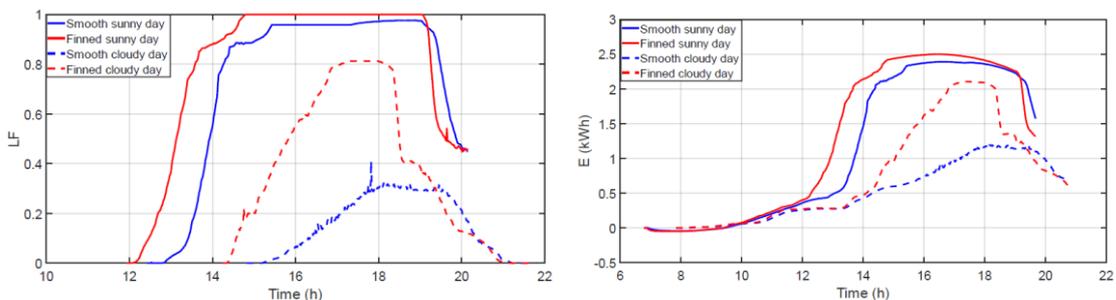


Figura 8. Fracción líquida y energía almacenada. [14]

1.2.3. Bibliografía especializada

Existe una gran variedad de estudios respecto a la utilización de PCM para almacenar energía. Se investiga acerca de la mejora de transferencia de calor, de manera que el PCM use la mayor cantidad de calor disponible, entre las opciones se encuentra insertar el PCM en un metal [15]–[18], macro y micro encapsulación del PCM [19] [20] o PCM incrustado en una matriz de grafito [21] [22] entre otros. Estas opciones se proponen como solución al problema de baja conductividad térmica del PCM, que implica pequeños coeficientes de transferencia de calor y, en consecuencia, los ciclos térmicos son lentos.

Uno de los estudios que destacan es el realizado por Gil et al. [23] cuya instalación se compone de dos tanques de almacenamiento latente en un concepto de intercambiador de carcasa y tubo, uno sin aletas y otro con 196 aletas cuadradas transversales. Como resultado, obtuvieron que el tanque con aletas aportaba una mejora a la conductividad efectiva del PCM durante el proceso de fusión y, podría ser una valiosa herramienta para procesos de carga o descarga parcial.

Varios autores han investigado diferentes configuraciones de intercambiadores de calor con PCM mediante técnicas de adición de aletas [24], espumas metálicas [25][26], anillos, agitación de burbujas... que pudieran mejorar la transferencia de calor desde el fluido caloportador hacia el material de cambio de fase.

Estudios como el realizado por Al-Abidi et al [27] [28] emplearon un intercambiador de calor de tubos triplex con aletas. En su interior contenía PCM con el cual pudieron examinar el proceso de carga de PCM, bajo una temperatura de entrada del fluido caloportador constante y no constante, al igual que el proceso de descarga. El fin de este estudio fue analizar el efecto más significativo de transferencia de calor, entre la temperatura de entrada del fluido caloportador y el caudal másico, obteniendo como resultado un mayor efecto del primero.

Raul et al.[29] añadieron aletas a un sistema de almacenamiento de energía térmica de calor latente de tubo y carcasa multitubo (LHTES). Pudieron observar una ligera reducción en la temperatura del fluido caloportador de salida durante el proceso de carga del LHTES con 12 aletas en el lado del PCM comparado con el LHTES sin aleta, como se muestra en la Figura 9, debido a la transferencia de calor mejorada entre PCM y el fluido caloportador en presencia de aletas en el lado del PCM. Además, obtuvieron una eficiencia de descarga en sistema sin aletas de 88.07% y 91.68% en el aleteado. Por tanto, comprobaron que se pudo mejorar el rendimiento térmico del sistema de almacenamiento de energía térmica de calor latente mediante la inclusión de aletas en el lado del PCM.

Capítulo 1. Introducción

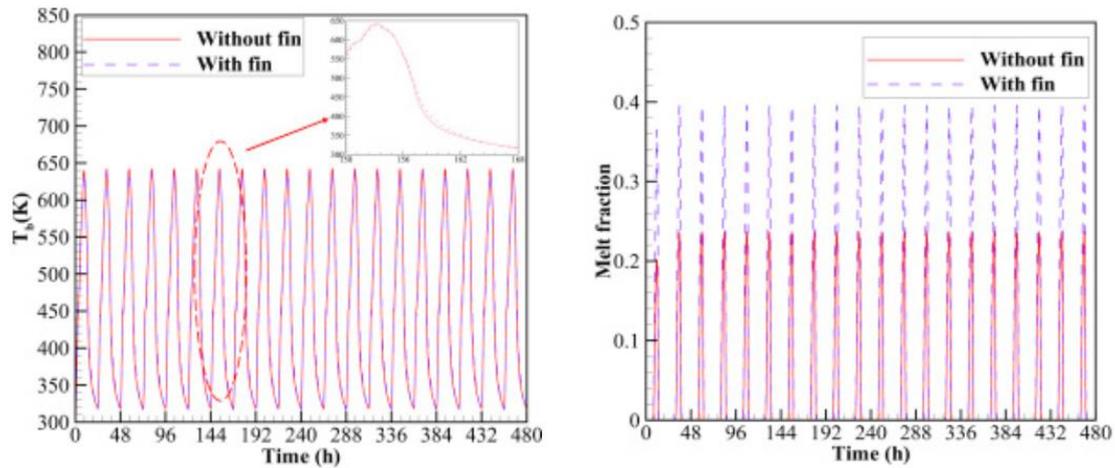


Figura 9. Variación transitoria de temperatura en la salida de LHTES y la fracción de fusión. [29]

También, han sido desarrollado proyectos innovadores como un modelo de aleta helicoidal [30] para sistemas de almacenamiento de energía térmica de calor latente. La comparación de estos con los sistemas compuestos por aletas convencionales indica que se pueden obtener mayor rendimiento térmico en el proceso de carga.

Zhai et al. [31] Realizaron una investigación experimental, así como, un análisis del rendimiento de una unidad de almacenamiento en frío de tubo de aletas, con material de cambio de fase en toda la unidad. Emplearon cuatro aletas anulares y cuatro rectangulares que les permitieron dividir el espacio interior en veinte porciones y, obtener las variaciones en la capacidad de carga y en la tasa de carga mostradas en la Figura 10. Una mejora pudo ser contemplada tanto por las aletas anulares como, por las aletas rectangular, tras reducir en un 71,2% el tiempo de cambio de fase en comparación con la unidad sin aletas.

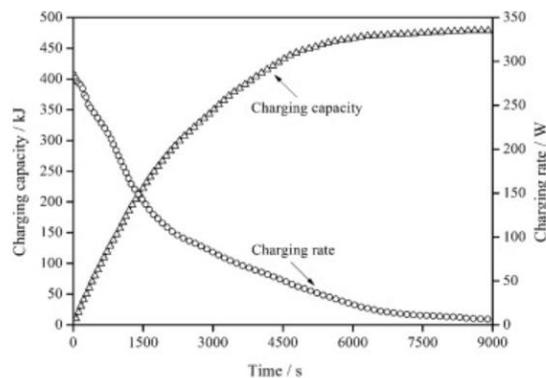


Figura 10. Variación en la tasa de carga y la capacidad de carga [31]

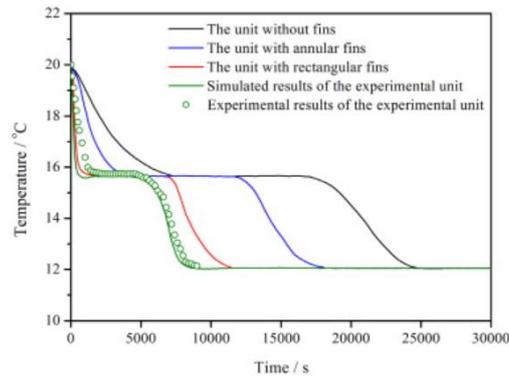


Figura 11. Variaciones de temperaturas del PCM en cuatro unidades diferentes [31]

Cárdenas et al. [32] debatieron acerca de las técnicas para mejorar el rendimiento de la transferencia de calor. Entre las mejoras, mencionan aletas y superficies extendidas, matrices porosas con PCM incrustado, dispersión de partículas conductoras dentro del PCM, método de uso de PCM múltiple. Como conclusión, se recomienda un método de extensión de la superficie de las aletas distribuidas ortogonalmente al eje de las tuberías.

E. Zayed et al [33] centran su investigación en los diversos desarrollos de PCM y CTSPCM (almacenamiento de PCM en cascada) y, la disposición en tanques de almacenamiento solar con SWC (colectores solares de agua). Además, proponen la técnica de almacenamiento térmico en cascada debido al rendimiento de los dispositivos de energía solar. En la Figura 12, se puede observar el esquema multi-tanque de la investigación.

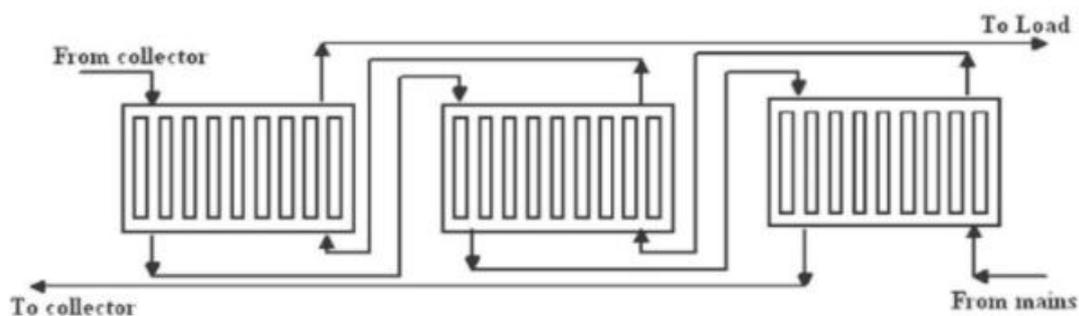


Figura 12. Multi-tanque PCM en cascada con sistema SWC. [33]

Por último, Abdelgaid et al. [34] proponen aletas huecas cuadradas y circulares para la mejora de transferencia de calor. Realizaron varios escenarios en los que emplearon un tipo de aletas en cada uno de ellos, en los que registraron las temperaturas y la intensidad solar entre otros. En la Figura 13, se observa los comportamientos de la temperatura durante un día de las aletas huecas cuadradas, circulares y convencionales. Debido al aumento del área de las aletas dado que son huecas, las temperaturas del agua salada son mayores en los nuevos tipos de aletas respecto a las convencionales.

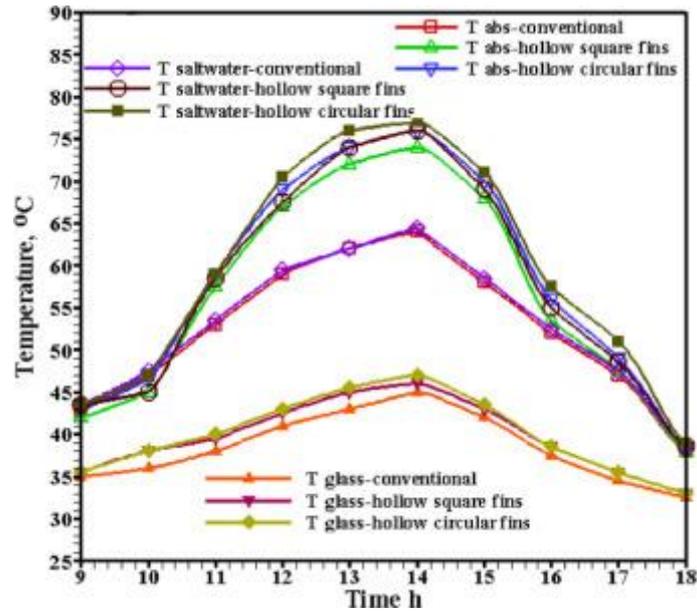


Figura 13. Variación de la productividad horaria con aletas huecas cuadradas / circulares y convencional.

En cuanto a los rendimientos obtenidos de cada tipo de aletas, obtuvieron un 33% de mejoría en las aletas huecas cuadradas y un 47,1% las aletas circulares huecas.

2. Descripción de la instalación

La instalación empleada forma parte de una colaboración internacional entre universidades, entre ellas, Wroclaw University, UAI (Chile) y PUCCM (República Dominicana). El objetivo de este proyecto de nombre ACCUSOL, se centra en la elaboración de un sistema para la climatización de edificios mediante la aplicación de células fotovoltaicas, acumuladores de calor y colectores solares.

El equipo de investigación se localiza en la azotea del edificio ELDI de la Universidad Politécnica de Cartagena, sobre el Laboratorio de Energías Renovables. Esta instalación se ha desarrollado a partir de una instalación solar térmica ya existente.

En la instalación, se puede diferenciar dos partes, un circuito principal que se encarga de calentar el fluido caloportador, agua en este caso, desde los colectores a los acumuladores (proceso de carga). Y otro circuito de descarga, mediante el cual conseguimos refrigerar el fluido caloportador, con el fin de solidificar el PCM, dado que si este proceso se hiciera de forma natural abordaría demasiado tiempo.

El desarrollo de la instalación se define más extensamente en los TFE de Belmonte [10] y Zamora [11]. En la Figura 14, se muestra un esquema de la instalación.

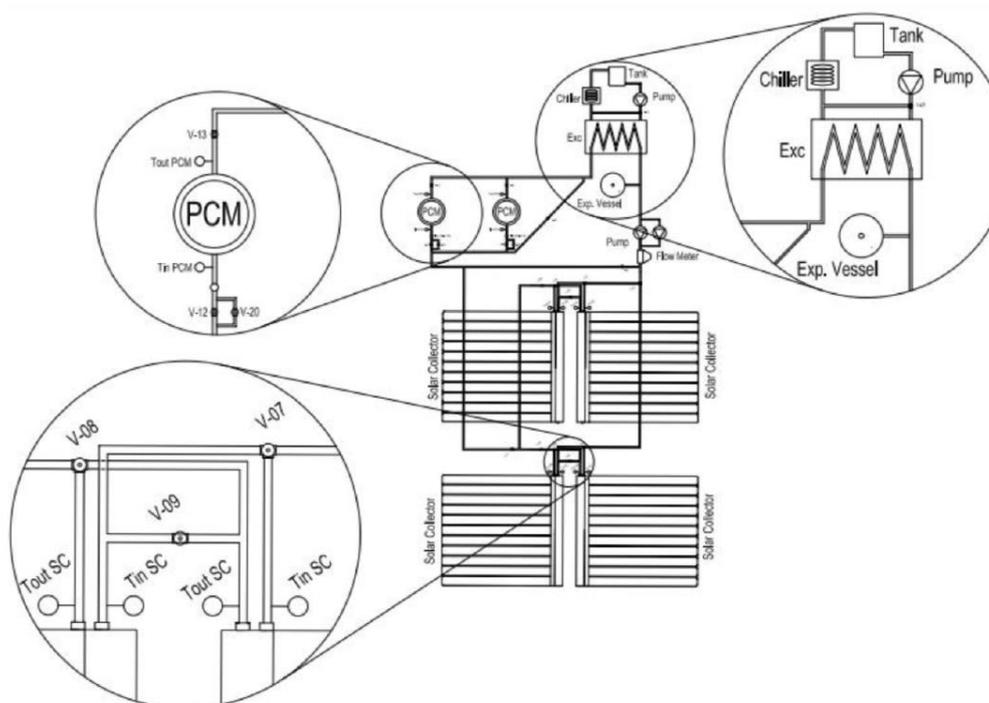


Figura 14. Esquema de la instalación actual

Este proyecto está destinado íntegramente a la investigación, por lo tanto, no necesita cumplir los requisitos específicos de la norma UNE-EN 806-1:2001 (Especificaciones para instalaciones de conducción de agua destinada al consumo humano en el interior de edificios) [35]. Teniendo este factor en cuenta, los elementos principales, tal y como se recogen en los trabajos fin de grados de Zamora y Belmonte [11] [10] son los siguientes:

- Colectores solares: dispositivos diseñados para coleccionar la radiación solar y convertir la energía térmica en calor.
- Acumuladores: equipo donde se almacena la energía gracias al PCM que se encuentra en su interior y, por donde circula el agua caliente necesaria mediante una entrada y una salida donde se almacena la energía
- Circuito de carga o primario: se trata de un circuito cerrado por donde circula el fluido caloportador, agua, desde los colectores hacia los acumuladores.
- Circuito de descarga o secundario: es un circuito cerrado que transporta la energía térmica almacenada en el acumulador al tanque de agua de consumo
- Sistema de adquisición: la instalación necesita un sistema que nos permita obtener información de los diferentes dispositivos preparados para medir diferentes parámetros, como la temperatura en cada instante
- Sistema de control: Permite ajustar y controlar el funcionamiento del sistema (válvulas, colectores...) en todo momento, además de mostrar las temperaturas en todo momento.

2.1. Instalación solar térmica

La instalación solar de la que se parte está previamente instalada y, actualmente, está compuesta por cuatro acumuladores, cuatro colectores solares térmicos, un equipo de bombeo, tuberías aisladas térmicamente y ciertos elementos secundarios como válvulas, piranómetro...

A continuación, se explican brevemente las principales características de estos elementos. Se puede encontrar un estudio más detallado sobre todos los componentes de la instalación en el TFE de Antonio Zamora [11].

2.1.1. Colectores solares térmicos

Los colectores solares de los que se dispone son de tubo vacío de la marca VIESSMAN, modelo VITOSOL 300-TM. La instalación cuenta con cuatro colectores, uno de ellos se encuentra incompleto, siendo su número de tubos la mitad de los que podría disponer, de manera que su rendimiento difiere al resto. En la Tabla 1, se encuentran las características de un colector completo.

Tabla 1. Propiedades de los colectores solares térmicos

N.º TUBOS	ÁREA BRUTA (M ²)	ÁREA ABSORCIÓN (M ²)	CAUDAL NOMINAL (L/H)	RENDIMIENTO	PRESIÓN FUNC. MÁX	Tª ESTANC (°C)
24	4,61	3,03	78	$0,54-1,1158 \cdot T^* - 0,005 \cdot (T^*)^2 \cdot G$	600kPa	155

Capítulo 2. Descripción de la instalación.

Para la elección de colector, se estudió el rendimiento referido a la superficie total que podía ofrecer este modelo de tubos de vacío respecto a un modelo de colector plano, tanto en verano como en invierno, considerando como temperatura de trabajo 80 °C y, como temperatura ambiental media en el mes de junio de 25 °C y 11 °C en diciembre.

En la Figura 15 se observan los colectores nombrados.



Figura 15. Colectores tubo vacío

2.1.2. Equipo de bombeo

Dado que se espera que el proceso de carga se realice a diferentes tipos de caudales, dependiendo si se pretende realizar ensayos o enfriar la instalación, es necesaria una bomba que pueda cubrir las tasas de flujos estipulados para los ensayos.

Se consigue que el agua circule a la presión a la que se diseñó gracias a la bomba instalada, esta es capaz de impulsar el fluido y superar las pérdidas derivadas del resto de los componentes.

La bomba disponible es la MKX-1395 3-6, del fabricante AIG PUMPS y permite trabajar a una temperatura de fluido máxima de 110 °C, con una potencia nominal de 0,55 kW.

2.1.3. Enfriadora y depósito

El conjunto de enfriadora y depósito tiene como objetivo principal enfriar el fluido caloportador, agua, del circuito primario, de manera que, la temperatura vuelve a ser cercana a la de red.

Por esta razón, se seleccionó la enfriadora modelo 30RA009 de la marca Carrier. Este tipo tiene la potencia suficiente para disminuir las elevadas temperaturas que alcanza el fluido en el sistema.

Gracias a la función de este conjunto, se puede ensayar días continuos. Además, permite enfriar hasta una determinada temperatura y, de esta manera, comenzar los ensayos con la misma temperatura de partida en los acumuladores.



Figura 16. Enfriadora y depósito

2.1.4. Equipo hidráulico

Los componentes principales, como los colectores, acumuladores, enfriadora, etc. Se encuentran conectados por medio de una estructura de tuberías de cobre sanitario (UNE-EN 1057) de 28 mm de diámetro exterior, 25 mm de diámetro interior y 1,5 mm de espesor, junto con codos de 90°, uniones en "T" y reducciones de 28 mm a 22 mm, todo de cobre sanitario.

Se utilizaron filtros a la entrada del tramo de colectores, para garantizar la durabilidad de los elementos de la instalación. También, se colocaron purgadores en los puntos más altos, con el fin de expulsar el aire existente acumulado durante el funcionamiento de la instalación.

Diferentes configuraciones del circuito de carga son posibles gracias a los actuadores y válvulas localizados en la instalación.

Los actuadores permiten regular el caudal de la instalación de forma remota, a través de un software instalado previamente en un ordenador. Este software permite abrir o cerrar la sección de paso regulando, así el flujo del circuito será a elegir.

Las válvulas instaladas son de tipo asiento de dos y tres vías, pudiendo ser de control o divisoras. Estas válvulas son de la marca SAUTER y, garantizan la regulación de la carga del circuito con una pérdida de carga entre 0,1 bar y 0,3 bar y permiten, como se ha mencionado anteriormente, distintas configuraciones en el sistema, como pueden ser, en serie-paralelo y con la selección entre uno a cuatro colectores.

2.1.5. Instrumentación presente en la instalación

En el sistema se encuentra la instrumentación necesaria para poder medir las distintas variables existentes como la radiación, caudal, temperaturas...Todas estas variables permiten realizar un estudio con mayor exactitud y precisión respecto a los ensayos. La instrumentaría empleada se presenta a continuación.

2.1.5.1. Caudalímetro

Los caudalímetros permiten conocer la cantidad exacta que circulará en cada uno de los acumuladores, es decir, el caudal total que dispondrá el sistema como el caudal que pasará por cada acumulador.

Capítulo 2. Descripción de la instalación.

En la Figura 17, se muestra el caudalímetro general de tipo Coriolis, modelo Prime 25 de la serie ROTAMASS Total Insight de YOKOGAWA.



Figura 17 Caudalímetro Coriolis

2.1.5.2. Piranómetro

Se dispone de un piranómetro modelo GEO-SR20 de la marca GEONICA para la obtención de la medida de irradiancia solar por superficie plana (W/m^2), desde un campo de visión de un ángulo de 180 grados.



Figura 18. Piranómetro

En la Figura 18, se puede observar una cúpula cuya función es reducir la medición de errores causados por los depósitos del rocío a primeras horas de la mañana.

En la Tabla 2, se adjuntan algunas especificaciones pertenecientes a este instrumento pudiendo encontrar más detalles en la hoja de características proporcionada por el fabricante [36].

Tabla 2. Especificaciones propiedades piranómetro modelo GEO-SR20 [36].

DATOS DE INTERÉS	VALORES
TIPO DE SENSOR	Termopila
RANGO ESPECTRAL	285 - 3000 nm
SENSIBILIDAD	7-25 $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$
SENSIBILIDAD (NOMINAL)	15 $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$
RANGO DE TEMPERATURA	-40 °C - +80°C
RANGO DE IRRADIANCIA	0 - 4000 W/m ²

2.2. Sistemas de acumulación

Como se ha mencionado antes, actualmente la instalación se encuentra compuesta por cuatro acumuladores basados en la metodología de los intercambiadores de calor carcasa y tubo. El fluido caloportador fluirá por los tubos mientras que el PCM se encontrará ocupando toda el área de la carcasa.

Dos de los acumuladores han sido las últimas adquisiciones del sistema, comparten las mismas dimensiones y difieren en su configuración interna. Uno de ellos, contiene espumas en su interior, este tipo de acumulador fue desarrollado y estudiado por Alberto Egea en su TFM [4]. El otro tiene la configuración de un acumulador vacío cuyo desarrollo fue llevado a cabo por Jose Alberto Cros [37]

Respecto a los otros dos acumuladores, serán los protagonistas de este trabajo fin de grado. Esta pareja comparte las mismas dimensiones y distintas configuraciones al igual que los otros dos. En este caso, uno de ellos se caracteriza por una configuración con aletas y el otro con configuración de acumulador liso.

Domingo Fernández, pudo realizar un análisis en profundidad sobre el acumulador liso que se puede encontrar en su Trabajo Final de Master [13].

El diseño y la construcción de ambos acumuladores fueron realizados por la empresa SACOME en base a las instrucciones dadas por el grupo de investigación. Como material de todos los componentes de los acumuladores, se emplearon el acero inoxidable AISI 316L.

Capítulo 2. Descripción de la instalación.

Los acumuladores se dimensionaron a partir del volumen de parafina que es capaz de calentar un único colector en el mes de menos radiación diaria media (diciembre). Según este resultado, la capacidad debería ser de alrededor de 30 litros.

Algunas de las especificaciones que se pidieron y, por lo tanto, los acumuladores disfrutan actualmente son:

- El flujo del agua debe discurrir por un único tubo con el fin de que pueda desarrollarse completamente.
- Abertura para realizar el llenado del PCM.
- Aberturas para insertar varillas de termopares en la sección transversal de la carcasa.
- Dos salidas en la parte inferior para la conexión de los termopares.
- Dos aberturas para permitir la salida del aire.
- Válvula de esfera para el vaciado.
- Instrumentación para medir las temperaturas.

A continuación, se muestran los planos de diseño del acumulador liso en la Figura 19.

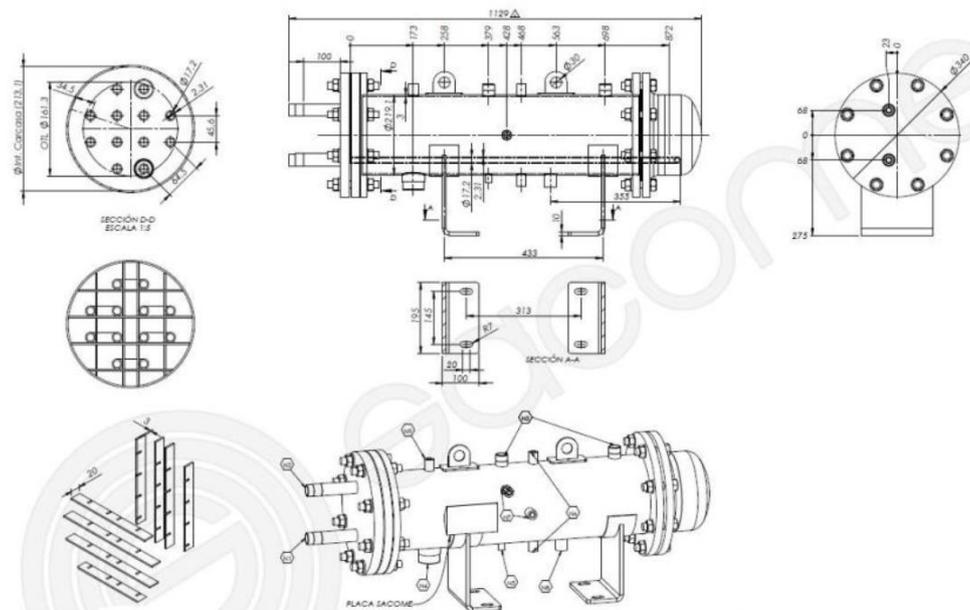


Figura 19. Plano acumulador liso. Diseño propiedad de SACOME

Como es de entender, el acumulador aleteado Figura 20 presume de mayor área de transferencia de calor frente a volumen de PCM, por lo que su relación asciende a $160 \text{ m}^2/\text{m}^3$ siendo para el acumulador liso de $20 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

EXPANSIÓN VOLUMÉTRICA	12,5 %
PUNTO DE INFLAMABILIDAD	227 °C
TEMPERATURA MÁXIMA DE OPERACIÓN	100 °C

Además de aportar gran información sobre el material, Lillevold Skaug [9] profundizó en el estudio de las propiedades del PCM. Se obtuvieron las siguientes correlaciones que se utilizarán para el posterior procesamiento de datos.

$$c_p = \begin{cases} -1.5334797 \cdot 10^{-3} \cdot T^3 + 1.522364 \cdot T^2 - 487.7585 \cdot T + 5.221908 \cdot 10^4 & T < 342K \\ 6.7473 \cdot 10^{-3} \cdot T^3 - 7.458979 \cdot T^2 + 2.7518 \cdot T - 3.362896 \cdot 10^4 & T \geq 342K \end{cases} \quad (\text{ec.4})$$

$$\mu = 7.97145 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 + 9.17987 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 3.5327714495 \cdot 10^{-2} \cdot T + 4.54735 \quad T \geq 342K \quad (\text{ec.5})$$

$$k = \begin{cases} -0.000392544984 \cdot T + 0.597853991067 & T < 322K \\ -0.011331349729 \cdot T + 4.129011884162 & 322 \leq T < 349K \\ -0.000218219365 \cdot T + 0.250839164873 & T \geq 349K \end{cases} \quad (\text{ec.6})$$

$$\rho = \begin{cases} 802.06 & T < 339K \\ 1231.26 - 1.266258 \cdot T & T \geq 339K \end{cases} \quad (\text{ec.7})$$

2.4. Medidas de temperatura

Dado que el objetivo principal de la instalación es estudiar la transferencia de calor mediante convección natural en el interior de los acumuladores, es necesario la recopilación de temperaturas en diversos puntos. Este factor permite conocer el estado físico que se encuentra la parafina en diversos instantes del ensayo, así como obtener unos análisis más precisos.

Después de mucho trabajo, el equipo de investigación resolvió cómo medir la temperatura de los dos puntos considerados en la ecuación que rige el fenómeno: la superficie sólida que transmite el calor y la zona del líquido donde hay convección.

$$q'' = h \cdot (T_{pared} - T_{líquido})$$

Esta investigación se puede encontrar en el Trabajo Final de Master de Antonio Zamora [11].

A continuación, se muestra el resultado en los siguientes apartados.

2.4.1. Temperatura de la pared

Tanto la medición de la temperatura de pared como la de la parafina se obtienen mediante termopares tipo T. Puesto que este tipo de termopares resultan económicos, permite una mayor facilidad para implantar un número elevado de ellos en los acumuladores. Estos dispositivos tienen como desventaja una precisión menor.

El método de colocación de los termopares en la superficie de los tubos se realizó mediante soldadura por resistencia, análogo a la soldadura por puntos.

Debida a las diferencias entre acumulador liso y aleteado, existen pequeñas diferencias técnicas en cuanto a la colocación de termopares en cada uno de ellos.

Se realizaron soldaduras en tres tubos lisos y tres tubos aleteados, se puede ver la disposición de estas en ambos acumuladores en la Figura 21.

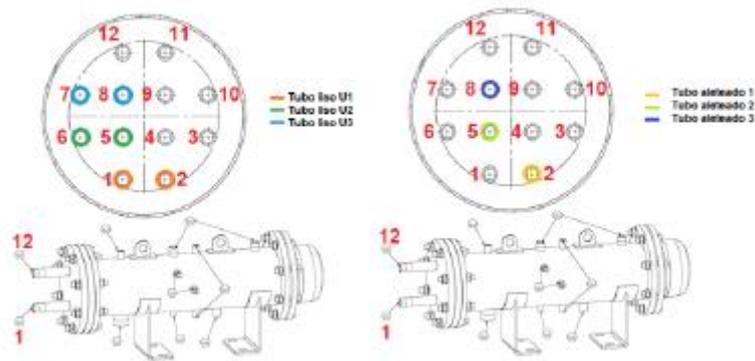


Figura 21. Disposición de los tubos instrumentados en el acumulador

En algunas áreas, una determinada parte del tubo tiene un termopar, cuya función es mostrar la diferencia de temperatura que puede ocurrir durante la carga y descarga del acumulador.

2.4.2. Temperatura de la parafina

Se trata de una necesidad conocer la temperatura de la parafina localizada en ambos acumuladores. Se coloraron unas varillas de plástico termorresistente dotadas de termopares, tanto de forma longitudinal como vertical en los acumuladores a través de cuatro aberturas en las partes centrales de la carcasa (Figura 22).



Figura 22. Varilla dañada extraída (derecha) y detalle de varilla (izquierda)

En total, cada acumulador cuenta con cuatro varillas. El acumulador aleteado se compone por las varillas nombradas como F1, F2, F3 y F4 (Figura 23) y el acumulador liso como F5, F6, F7 y F8 (Figura 24).

A continuación, aparecen representadas la posición de las sondas y de los termopares en ellas para cada acumulador.

Capítulo 2. Descripción de la instalación.

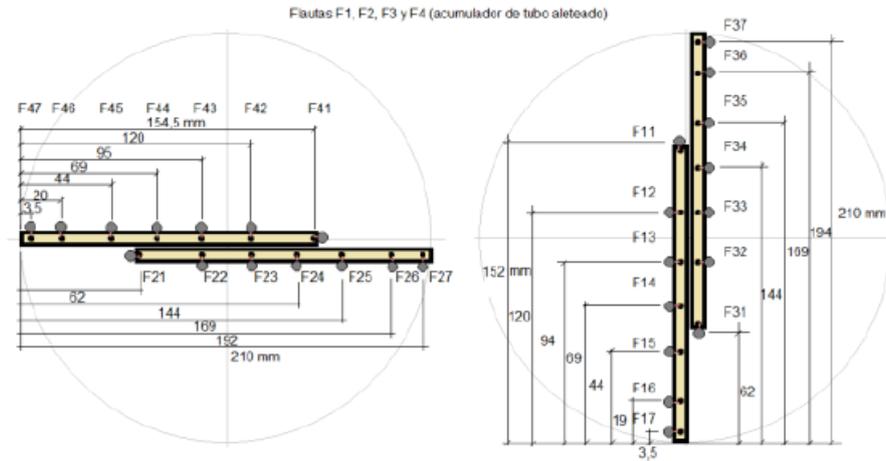


Figura 23. Disposición de las sondas y posición de los termopares del acumulador aleateado

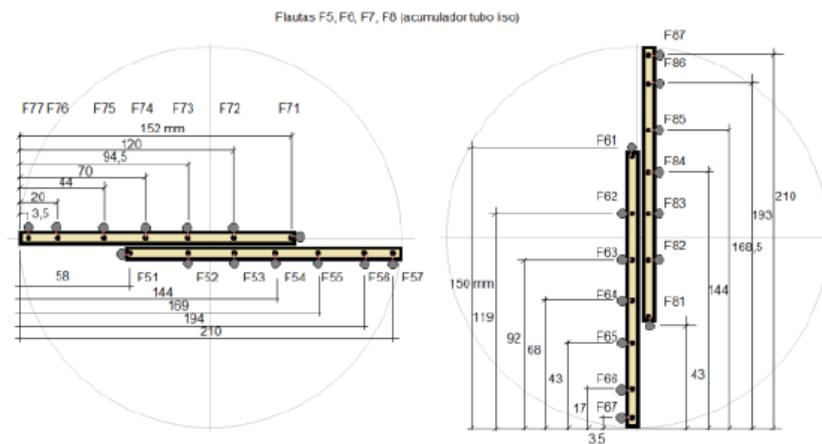


Figura 24. Disposición de las sondas y posición de los termopares del acumulador liso

2.4.3. Temperatura del agua

La instalación dispone de dos PT100 en los conductos de entrada y salida del acumulador. Se trata de RTD de cuatro hilos de clase B, 1/10 DIN, con un error de medición de $\pm 0,03$ °C. Estos dispositivos permiten conocer con mayor precisión la energía transferida por el agua a la parafina. La ventaja de este tipo de sensor reside en su alta precisión y fiabilidad y, su curva de medición es más lineal que la de los termopares.

2.5. Sistema de adquisición de datos

Tanto para la adquisición de datos como para el control de la instalación se ha mantenido el sistema implementado en [11]. Se dispone de unidad de medida Agilent Keysight 34980A con sus correspondientes módulos y tarjetas. Un equipo de control tipo PLC para el control de las señales, para ello, se ha empleado un controlador CompactRIO de National Instruments.

Ambos equipos se gestionan mediante LABVIEW que cuenta con librerías para comunicar ambos equipos comentados anteriormente.



Figura 25. Elementos de adquisición y control. Fuente: Antonio Zamora [11]

2.6. Mejoras en el Sistema

Durante la realización de los primeros ensayos pertenecientes a este TFE, se podía observar la pérdida de algunos sensores, es decir, su medición no era correcta o se desviaba completamente de su resultado.

Las causas de este suceso se desvían a deterioro por edad del termopar, desconexión de cables, mala soldadura o rotura por causas atmosféricas como el agua de la lluvia que puede llegar a producir oxidación.

Para intentar recuperar estos termopares y así, poder obtener un análisis más exacto con el mayor número de medidas disponibles, primero se comprobaron conexiones entre macho y hembra de las fichas de cada termopar, conectados a los acumuladores liso y aleteado.

En este paso, se encontraron algunos cables desconectados y algunas fichas deterioradas que necesitaban ser cambiadas. También, se procedió al renombrado de los cables pues dado el tiempo de la instalación, gran parte se encontraban sin etiquetar y a la creación de un Excel indicando las conexiones para posteriores comprobaciones.

Adicionalmente, se realizó un nuevo aislamiento en aquellas zonas de las tuberías del sistema y acumuladores necesarias que su estado se encontraba deteriorado por el sol o que se encontraban dañadas por gaviotas.

A continuación, se puede observar en Figura 26, un antes y después de algunas zonas de la instalación donde se realizó el reaislamiento.

Capítulo 2. Descripción de la instalación.



Figura 26. Antes y después de la instalación

Después, se comprobaron las conexiones de los cables a las fichas que se encuentran conectadas al Datalogger. Este dispositivo ayuda a recibir las medidas que captan los diferentes instrumentos de la instalación.

Al igual que ocurría en el paso anterior, se encontraron varios cables sueltos por lo que se procedió a su conexión de nuevo. Este paso se realiza con el Datalogger apagado, seguidamente se desconecta la tarjeta de este y se comprueban uno a uno la conexión de los cables. Una vez finalizada la tarea se repite el paso inverso, es decir, se conecta la tarjeta al equipo y se procede a encender este.

Al finalizar ambas tareas, se realiza un ensayo de prueba mediante el programa Benchlink 34980A. Se pudo comprobar que gracias a los pasos anteriores pudimos recuperar algunos sensores, es decir, su medición vuelve a ser correcta, mientras que en el caso de otros termopares su medición seguía siendo errónea.

La solución para los termopares que continúan causando error, deriva al vaciado de los acumuladores para desinstalar los termopares cuya medición es errónea y soldar de nuevo por soldadura tipo resistencia nuevos termopares. Dado que para realizar este paso abarcaría demasiado tiempo y llevaría desinstalar los acumuladores también, durante el periodo de este estudio no se ha llevado a cabo.

3. Metodología de los ensayos

Como se ha comentado en el Apartado 2.5, los ensayos se controlan mediante el programa LabView que ajustó con los elementos de nuestra instalación Antonio Zamora [11] y que se ha ido mejorando. En este apartado, se abarca resumidamente la metodología de realizar un ensayo. Se puede encontrar una descripción más detallada del proceso en el TFE de Víctor Lorente [14].

Hasta el momento existe dos métodos de realizar un ensayo siendo estos de manera manual o programa. Es necesario valorar las condiciones meteorológicas del día deseado para reproducir un ensayo. Sin embargo, si el fin de la toma de datos va destinada a la información de temperatura en la que se encuentra los termopares localizados en los acumuladores, el factor mencionado no es necesario tenerlo en cuenta.

Como se ha citado, el ensayo se realiza mediante el programa LabView (Figura 27). Una vez dentro del programa se puede observar los elementos de la instalación a modo de esquema en el centro, en la parte izquierda se encuentra la configuración perteneciente para activar o desactivar los colectores, acumuladores, así como las bombas. Por último, en la parte derecha se encuentra los elementos pertenecientes a la toma de datos.

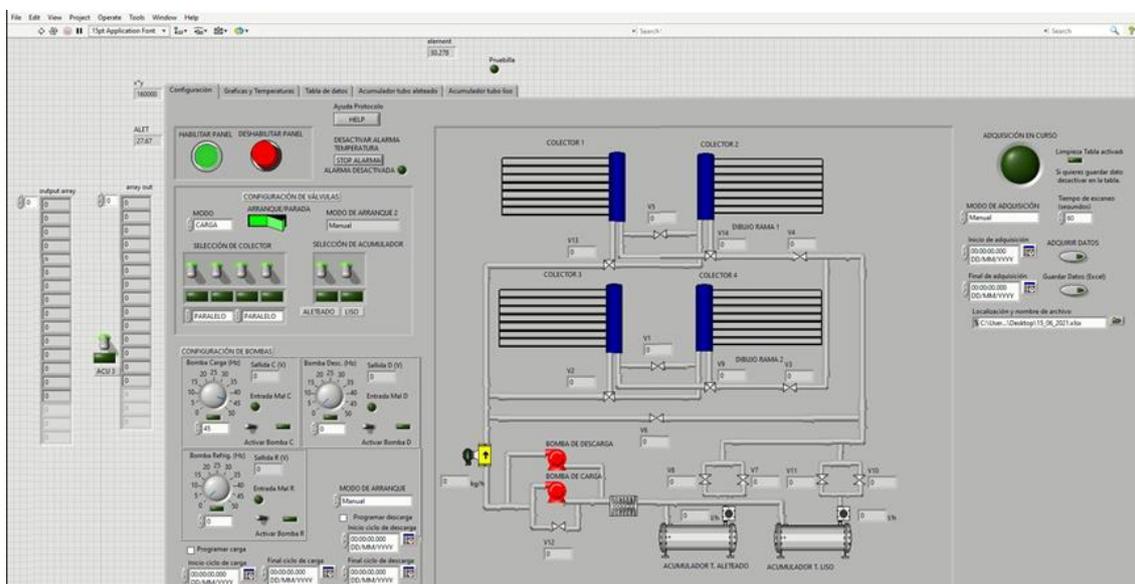


Figura 27. Programa Labview

Tanto si se realiza un ensayo manual o programado es necesario indicar el número de colectores que se desee emplear, así como el acumulador. Una vez se indican estos instrumentos, se observa que cambian de color las zonas señaladas en el esquema central de la instalación.

Para poder hacer circular el agua es necesario activar la bomba, en los ensayos producidos durante la elaboración de este TFE se ha empleado la bomba a 45 Hz, que equivale a un gasto

másico de 400 kg/h. Una vez activado esta, así como seleccionado los colectores y acumuladores se puede realizar un ensayo manual o programado.

En la realización de un ensayo manual se debe señalar esta opción en el modo de adquisición, que se localiza a la derecha y a adquirir datos. Tras realizar esto se le da a “run” y se puede verificar que se enciende una luz verde. Para poder visualizar los datos obtenidos es necesario dirigirse a la pestaña de tabla de datos.

Un ensayo programado necesita la indicación de la hora de arranque y parada de los distintos instrumentos. Los ensayos se realizan desde la primera hora del amanecer hasta la hora de anochecer, estas horas varían dependiendo del día que se realice el ensayo por esta razón es imprescindible saber dichas horas.

Se indica la hora de inicio y final de ciclo de carga de la bomba, así como el día, en la parte izquierda inferior. También, se señala en la parte derecha del programa el periodo de toma de datos.

LabView es capaz de proporcionar los datos recopilados del ensayo en formato Excel. En el archivo se encuentra la fecha de realización del ensayo, así como la hora de captura de los datos. Es interesante conocer la hora de la toma de datos puesto que se puede realizar un estudio con mayor precisión.

Una vez finalizado el experimento, la instalación debe ser refrigerar para poder realizar ensayos en días continuos. Por este motivo, uno de los elementos de la instalación es la enfriadora que se activa mediante el programa “DRM software” (Figura 28). El procedimiento comienza seleccionando “4 Relay Brd USB-v1” como el tipo de dispositivo, continúa en la pestaña de “Device chip ID”, donde se selecciona “Device DAE0002a” y se le da a la ventana de “Open” y acaba conectando el Relay 1 activando de esta manera la enfriadora.

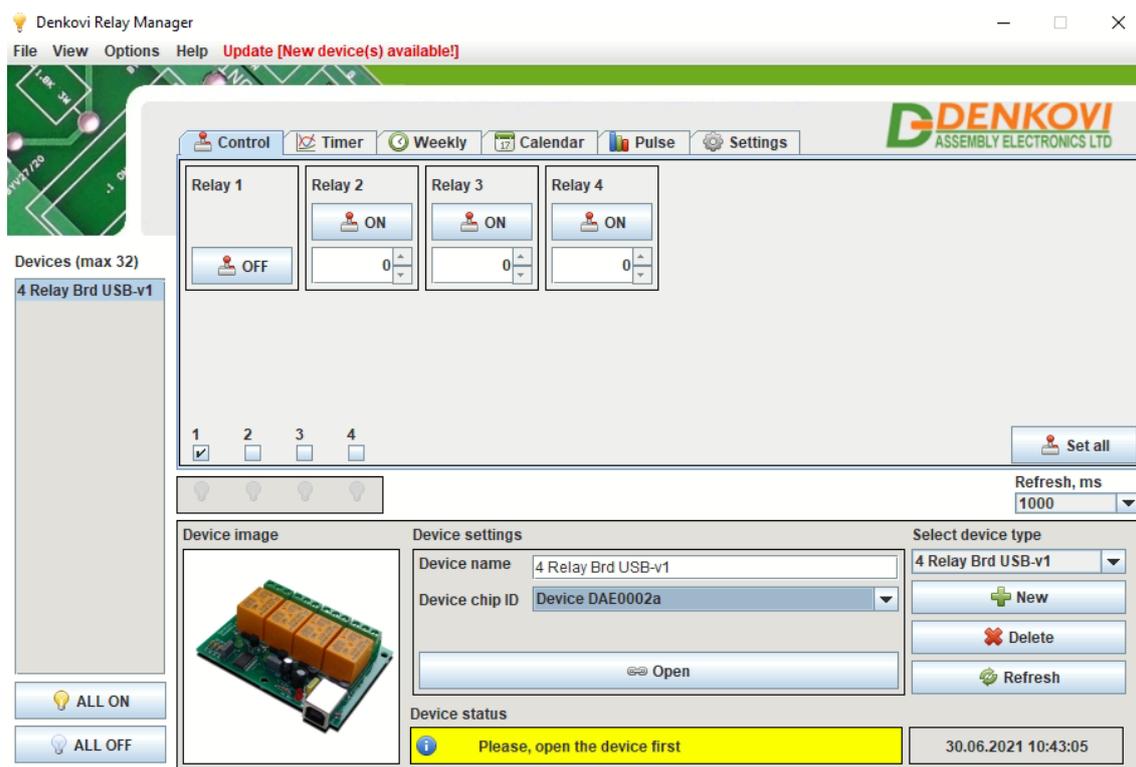


Figura 28. Programa DRM software

El agua de la enfriadora debe ser circulada por el sistema para conseguir enfriar el PCM a una temperatura entre 15-20 grados, estos valores se toman como referencia para que los ensayos empiecen aproximadamente a una temperatura similar.

Para hacer circular el agua es necesario activar la bomba responsable de esta función, esta bomba se activa desde LabView dentro de la pestaña llamada “Tools”. Dentro de esta pestaña, se selecciona “Distributed System Manager” donde en IB3 se marcará 0.02 A como corriente a la que se hará circular el agua.

3.1. Mejora en el procesado de datos

Como se ha comentado en el Apartado 2.5., los datos pertenecientes a los instrumentos de medición de la instalación se obtienen mediante el programa LabView. Este programa guarda toda la información en formato Excel incluyendo hora y día del ensayo realizado.

Los datos requieren de un procesado antes de realizar el estudio conveniente, dado que se puede dar la situación, durante el ensayo, de cierto error en un termopar u otros instrumentos de medición que afecte potencialmente a la hora de estudiar los resultados. La operación de procesar datos se lleva a cabo mediante un software matemático llamado Matlab, que permite la realización tanto de operaciones como gráficas.

Con anterioridad a este trabajo, el procesado de datos precisaba de diferentes tipos de cálculo o variaciones en el cálculo existente, dependiendo de la localización del termopar cuya medición es errónea y el tiempo empleado en procesar un ensayo podía variar entre una hora y media o dos horas. Por lo que, no existía un archivo válido para todos los ensayos, si no que la

composición de este documento Matlab variaba dependiendo de las necesidades de cada ensayo en particular. Esto podía derivar a error y, por tanto, unos malos resultados.

En este trabajo se ha trabajado en la mejora de este archivo consiguiendo un archivo completamente independiente a los distintos ensayos y errores de estos. Para conseguir este, se han añadido distintas funciones capaces de realizar operaciones dependiendo del número de colectores en funcionamiento y del tipo de acumulador utilizado. Como resultado, se ha reducido el tiempo de procesado siendo este aproximadamente entre treinta y cuarenta minutos.

Una de las variaciones propuestas, ha sido la creación de un Excel. En este documento se indica el número de colectores y los acumuladores, así como la fecha del ensayo. Matlab tras leer este Excel, ajusta sus cálculos a los parámetros obtenidos, evitando cálculos y la representación gráfica de datos que no son de interés. Adicionalmente, únicamente se guardarán los datos de los parámetros correspondientes.

Como se ha comentado en el Apartado 2.4.2, se dispone de cuatro varillas dotadas de instrumentos de medición, debido a la insuficiencia de dispositivos se realiza un reparto equitativo del área correspondiente a cada uno de ellos. De esta forma, se consigue adaptar los datos de temperatura a todo el acumulador. Los errores anteriormente se derivaban a un fallo en el cálculo del coeficiente propio de cada flauta de los acumuladores, es decir, en el área que abarca cada flauta. Esto sucede cuando una flauta cuya medición es errónea se debe eliminar con el fin de poder dar por válido un ensayo mediante un ajuste justo, en el que el área del instrumento que provoca el fallo queda repartida entre las flautas contiguas.

El código realizado requiere solamente de indicar la flauta errónea y, de esta forma, se realiza automática el cálculo necesario para repartir la superficie de esta, evitando de esta forma, que se pueda producir un fallo indeseado.

En cuanto al procesado de resultados, se ha creado un nuevo documento que resume los parámetros de estudio y es válido para cualquier acumulador de la instalación y futuros. Para que el programa muestre las gráficas deseadas, solamente se debe indicar el parámetro de estudio y los días que se deseen. La creación de esta función ha optimizado el tiempo de comprobación y selección de resultados notablemente.

4. Parámetros de estudio

4.1. Irradiancia

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, este proyecto es dependiente al tiempo, es decir, un gran ensayo se consigue mediante unas condiciones idólicas. No obstante, una curva que no cumpla estas condiciones no indica que sea un ensayo inválido. Como se verá más adelante, obtener dicha curva es complicado debido a distintos factores. Por tanto, este parámetro es uno de los más importante de estudiar. Una irradiancia afectada por nubes o perturbaciones afecta al rendimiento de la instalación, siendo este menor y pudiendo llegar a un ensayo no válido.

En condiciones ideales, se obtendría una gráfica de la irradiancia frente al tiempo similar a la campana de Gauss, cuyo comienzo corresponde a la salida del sol y su final, al atardecer. Además, alcanza un pico de producción a medio día como se mostrará más adelante. Esta curva es teórica, dado que depende de los factores meteorológicos como nubes que se den durante el día como la zona en la que se mida.

En algunos trabajos como en la Tesis de M^a Carmen Meizoso [38], establece además, una relación de la irradiancia con otras variables como las horas de sol, la temperatura y la precipitación.

La irradiancia es medida a través de un piranómetro cuyas especificaciones han sido mencionadas en el Apartado 2.1.5.2 y cuyas unidades serán W/m^2 .

En este proyecto, la irradiancia es capturada a través de los colectores disponible. La inclinación, orientación y localización afecta al valor de la irradiancia obtenido y, por lo tanto, se obtendrá una mayor eficiencia. Un estudio previo de la instalación será necesario con el fin de sacarle el máximo partido a la instalación.

4.2. Temperaturas

En esta instalación, existen varios parámetros cuyo conocimiento de temperatura es muy importante. Entre ellos, la temperatura del PCM que es posible medida gracias al trabajo realizado por Zamora y Belmonte en sus TFG como se ha mencionado en el Apartado 2.4.2.

Esta temperatura se puede calcular como una media ponderada de las diferentes temperaturas colectadas provenientes de los termopares situados en las varillas de los acumuladores. Se requiere conocer dichas temperaturas con el fin de estructural las zonas en las que se alcanza más temperatura, a su vez, las áreas en las que se encuentra fundido el PCM. Se distinguen tres medidas de las posiciones horizontales y verticales mostradas en la Figura 29.

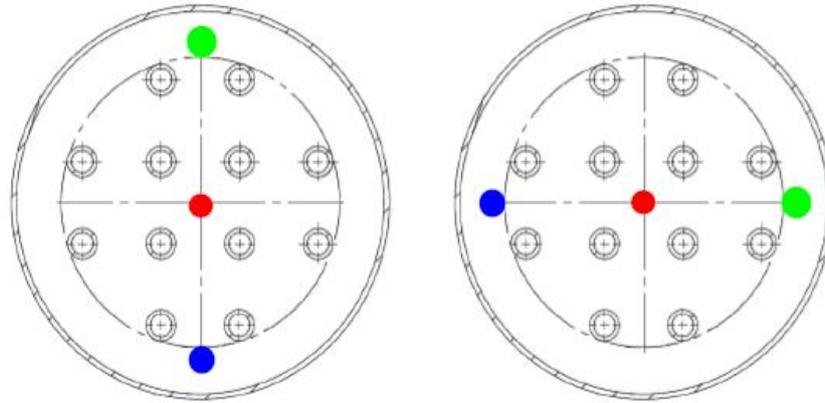


Figura 29. Posiciones horizontal y vertical

La temperatura de la pared se mide mediante una disposición de termopares soldados a la pared de los tubos de los acumuladores, para una observación en profundidad de los cambios de temperatura afectados por la posición. En la Figura 30, se puede observar la ubicación de los instrumentos de medida pertenecientes al acumulador liso y aleteado.

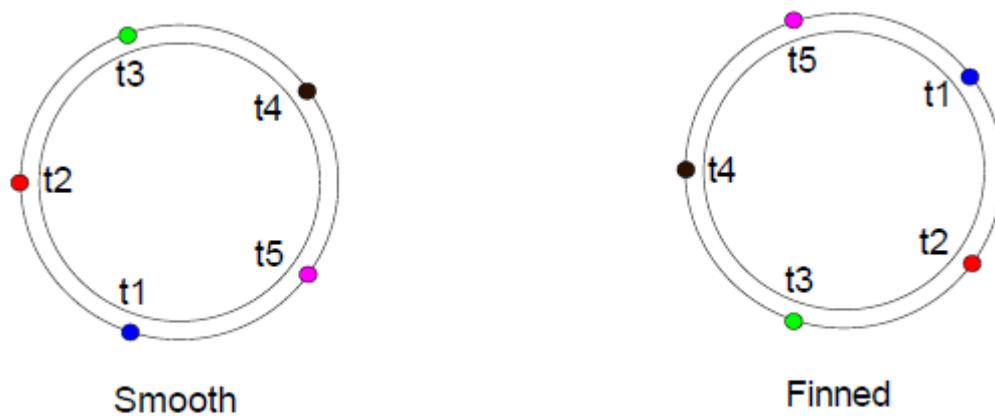


Figura 30. Distribución de termopares en la pared de acumular liso y aleteado.

Por último, se mide también la temperatura de las tuberías conectadas a lo largo del serpentín. Aunque la posición del serpentín no es simétrica en cuanto al eje vertical, el calor se cede a lo largo del proceso. De esta manera, se permite evaluar las temperaturas de entrada, salida e intermedias que se miden en las posiciones que se muestran en la Figura 31.

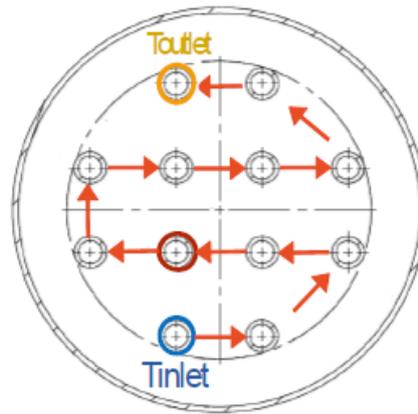


Figura 31. Disposición de los tubos del serpentín

4.3. Transferencia de calor

El calor no es un parámetro obtenido a través de un instrumento, si no se trata de una variable que se puede calcular a partir de los datos obtenidos por parte de los distintos equipos de medida de la instalación. Para el cálculo del calor, se ha usado la siguiente ecuación que nos relaciona la capacidad calorífica específica, que es la cantidad de energía, en forma de calor, que gana o pierde un sistema por unidad de masa, para que se produzca en él un cambio de temperatura de un grado, sin que haya cambio de estado:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (\text{ec. 8})$$

Donde \dot{Q} es el calor ganado o perdido en (W), \dot{m} es el gasto másico (kg/s), C_p es el calor específico (J/kg°C) y por último, ΔT es la variación de la temperatura (°C).

En esta instalación, se distingue el calor procedente a las pérdidas de la instalación y el calor que aportan los colectores, pudiendo así obtener el calor que es transferido a la parafina.

4.4. Energía almacenada y fracción líquida

La energía almacenada proporciona la cantidad de almacenamiento del sistema, por este motivo, es vital en el estudio de este proyecto su obtención, así como, la velocidad que se almacena en cada acumulador.

Al igual que el calor, es un parámetro que se obtiene mediante ecuaciones que dependen del estado en el que se encuentre la parafina. Si esta se encuentra en estado sólido o líquido la ecuación empleada será:

$$E = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (\text{ec. 9})$$

Donde E es la energía almacenada (J), m la masa de la parafina en el acumulador (kg), C_p es el calor específico (J/kgK) y ΔT es la variación de la temperatura (K).

En cambio, la siguiente ecuación se emplea cuando da lugar el cambio de fase:

$$E = m \cdot \lambda \cdot \frac{(T-T_S)}{(T_S-T_L)} \quad (\text{ec. 10})$$

Donde λ es el calor latente de fusión ($\frac{J}{kg}$) especificado en las propiedades de la parafina.

La fracción líquida mide el porcentaje del material de cambio de fase fundido, en tanto por uno, en el interior del sistema de acumulación. Este parámetro se obtiene de las medidas de los termopares distribuidos a lo largo del PCM, calculándose se la siguiente forma:

$$0 \quad T < T_S \quad (\text{ec. 11})$$

$$\beta = 1 \quad T > T_L \quad (\text{ec. 12})$$

$$\frac{T-T_S}{T_S-T_L} \quad T_S < T < T_L$$

$$\beta \begin{cases} 0 & T < T_S \\ 1 & T > T_L \\ \frac{T-T_S}{T_S-T_L} & T_S < T < T_L \end{cases} \quad (\text{ec. 11})$$

$$(\text{ec. 12})$$

$$(\text{ec. 13})$$

Donde T es la temperatura obtenida de los termopares, T_S vale 69 °C y T_L es 71 °C.

4.5. Números adimensionales

En este proyecto, también se han estudiado las diferentes variaciones que sufren los siguientes números adimensionales:

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \quad (\text{ec. 14})$$

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_w - T_{PCM}) \cdot D^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (\text{ec. 15})$$

Donde en la ecuación del número de Nusselt, h es el coeficiente de película, D es el diámetro exterior de los tubos del acumulador, k es la conductividad térmica del PCM. Y en la ecuación de Rayleigh, g es la aceleración de la gravedad, β es el coeficiente de expansión térmica, T_w es la temperatura de pared de los tubos del acumulador, T_{PCM} es la temperatura del material de cambio de fase, ν es la viscosidad cinemática y α es la difusividad térmica.

Se considera interesante el estudio del número adimensional de Nusselt debido a que indica la relación existente entre la transferencia de calor por conducción y, la transferencia de calor por convección desde la superficie de los tubos de los acumuladores, por donde circula el fluido caloportador.

En nuestro sistema, también se ocasiona una transferencia de calor por convección natural, el número de Rayleigh refleja la convección ocasionada en el seno del PCM frente a la conducción.

La representación gráfica de ambos números adimensionales, indica el proceso de fusión del material de cambio de fase y, por este motivo, es importante estudiar ambos.

5. Eficiencia

La eficiencia es un parámetro fundamental que permite conocer el estado de la instalación, es decir, indica si es rentable el procedimiento llevado a cabo o si se deben realizar mejoras en algunas partes del sistema para obtener mayor cantidad de energía almacenada. Este parámetro se ha calculado para analizar el rendimiento de la parafina elegida.

La investigación realizada en este trabajo ha llevado a cabo la mejora de eficiencia realizada por Víctor Lorente [14]. A continuación, se explicarán los cambios realizados para convertir el cálculo de este parámetro en un resultado más exacto y autónomo a la configuración del sistema.

La instalación Figura 32 presenta el acumulador aleteado y el acumulador liso, dos zonas de pérdidas y los colectores

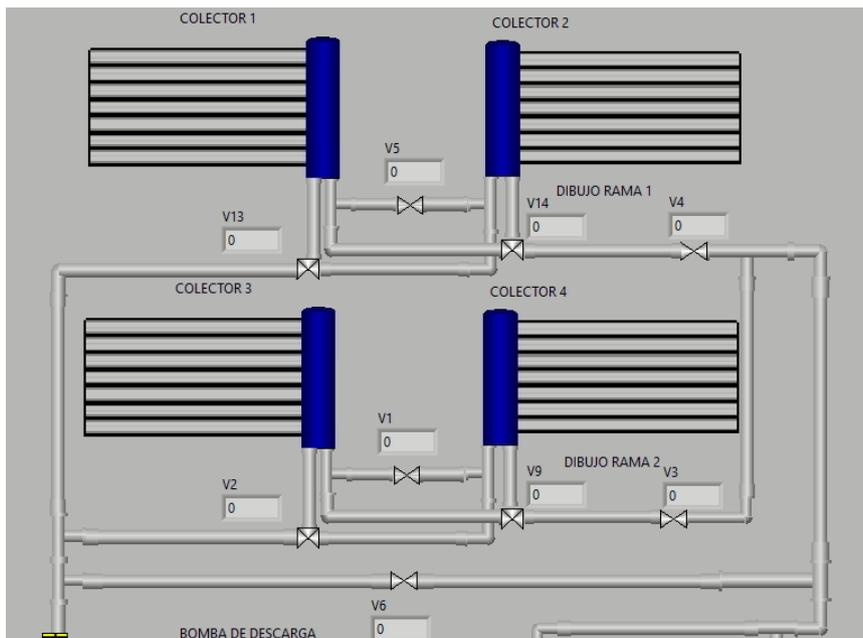


Figura 32. Esquema de la instalación

- El calor de los colectores (\dot{Q}_{Ct}), es el calor total que se dispone a partir de los colectores. Por esta razón, es un parámetro que depende del número de colectores que se encuentren en funcionamiento en cada ensayo. En la ecuación 16, las temperaturas son las correspondientes a la entrada y salida de cada colector, la capacidad calorífica del agua es calculada mediante la media de entrada y salida en cada instante de tiempo y, el gasto másico es el caudal de agua que circula por cada colector en cada instante de tiempo. El calor total de los colectores será la suma de cada uno de ellos como se expresa la Ecuación 17.

$$\dot{Q}_{C1} = \dot{m}_{\text{colector}} \cdot C_p \cdot (T_{\text{salida}} - T_{\text{entrada}}) \quad (\text{ec. 16})$$

$$\dot{Q}_{Ct} = \dot{Q}_{C1} + \dot{Q}_{C2} + \dot{Q}_{C3} + \dot{Q}_{C4} \quad (\text{ec. 17})$$

El caudal másico que atraviesa cada colector, se calcula mediante una función que reparte el caudal total, que circula por la instalación en un instante de tiempo, dependiendo de los colectores que estén en funcionamiento. De esta manera, teniendo en cuenta la configuración en paralelo de los colectores, es decir, dos colectores están en paralelo con los otros dos y al mismo tiempo en paralelo estos, el caudal total se dividirá entre la mitad o entre un cuarto.

Si se considera como pareja a los colectores uno y dos y, otra pareja a los colectores tres y cuatro, el caudal total siempre estará dividido entre dos si cualquier colector de ambas parejas está en funcionamiento, si este factor no se da, el caudal pasará íntegramente a la pareja que esté encendida.

Siguiendo la configuración de LabView, a continuación, se explica la cantidad de caudal que circulará por cada colector, teniendo en cuenta todas las situaciones que se pueden dar:

Situación 1:

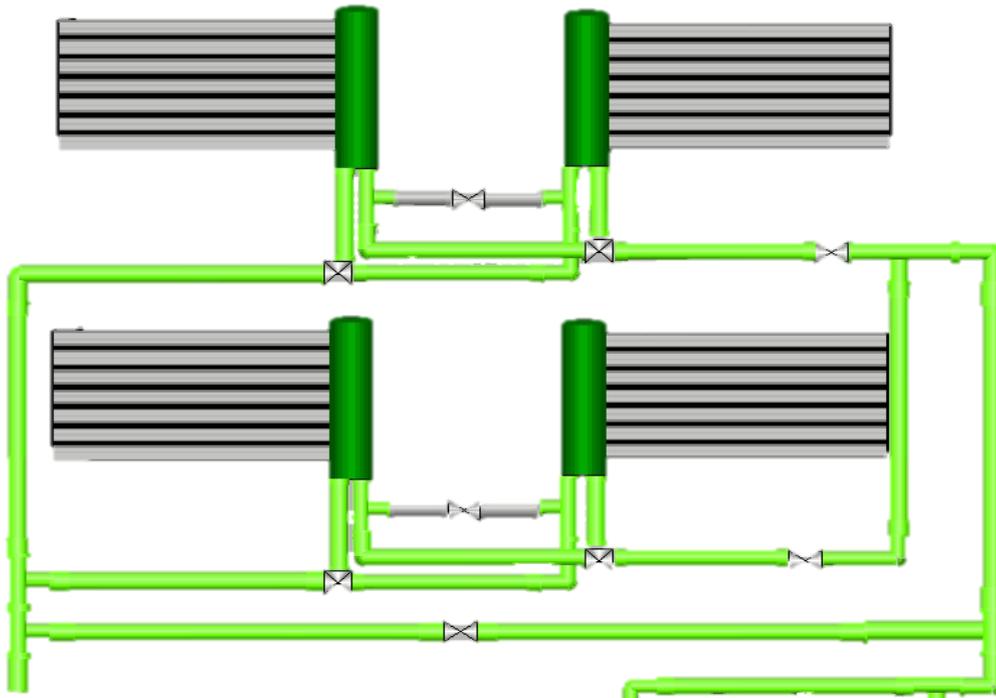


Figura 33. Esquema cuatro colectores activados

En la primera situación se considera cuatro colectores en funcionamiento, como se ha mencionado anteriormente, al menos un colector de cada pareja es necesario para que el caudal quede dividido entre la mitad. Además, en este caso, los dos colectores que forman las parejas están activados, por este motivo, el caudal volverá a dividirse entre dos, resultando el caudal que pasa por cada colector de valor de un cuarto.

En la Tabla 4, se resume los caudales que circularán por cada colector.

Tabla 4. Cálculo de caudal para cuatro colectores activados

COLECTOR	ESTADO	CAUDAL
1	Encendido	$\frac{1}{4}\dot{m}_{total}$
2	Encendido	$\frac{1}{4}\dot{m}_{total}$
3	Encendido	$\frac{1}{4}\dot{m}_{total}$
4	Encendido	$\frac{1}{4}\dot{m}_{total}$

Situación 2:

A continuación, se presenta la situación en la que se encuentra activados dos colectores.

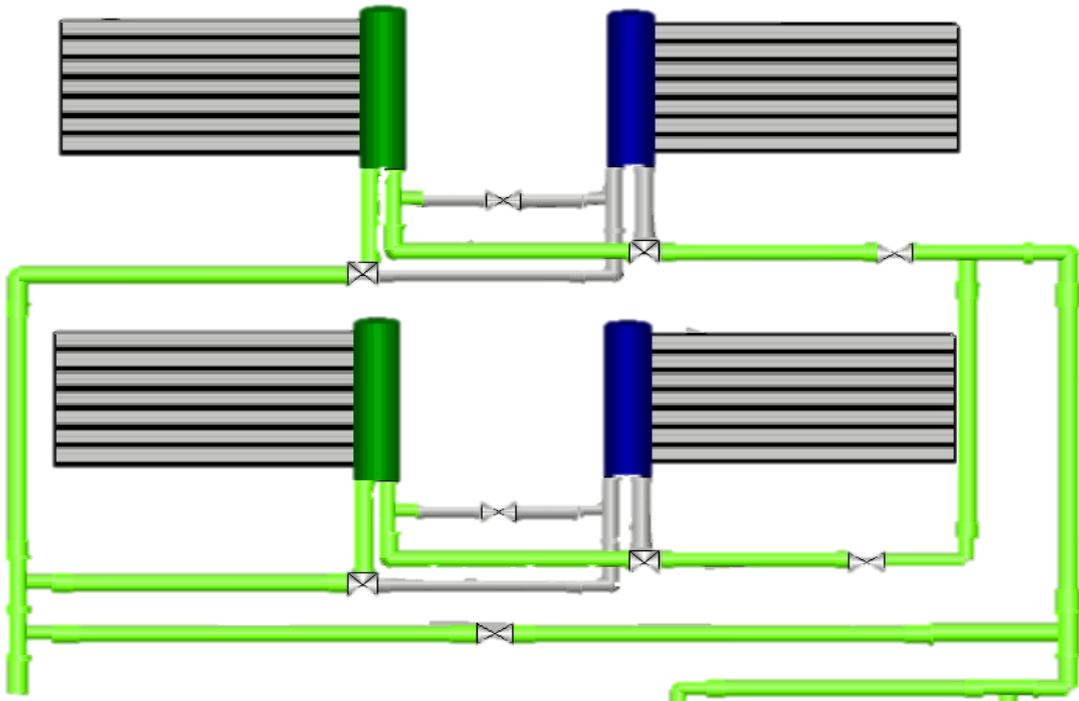


Figura 34. Esquema dos colectores activados

Dado que los colectores en funcionamiento corresponden uno a cada pareja nombrada, el caudal únicamente quedará dividido entre la mitad.

Tabla 5. Cálculo de caudal para dos colectores activados

COLECTOR	ESTADO	CAUDAL
1	Encendido	$\frac{1}{2}\dot{m}_{total}$
2	Apagado	0

3	Encendido	$\frac{1}{2} \dot{m}_{total}$
4	Apagado	0

Situación 3:

Por último, se añade que solo un captador solar se encuentre apagado, es decir, tres captadores en funcionamiento.

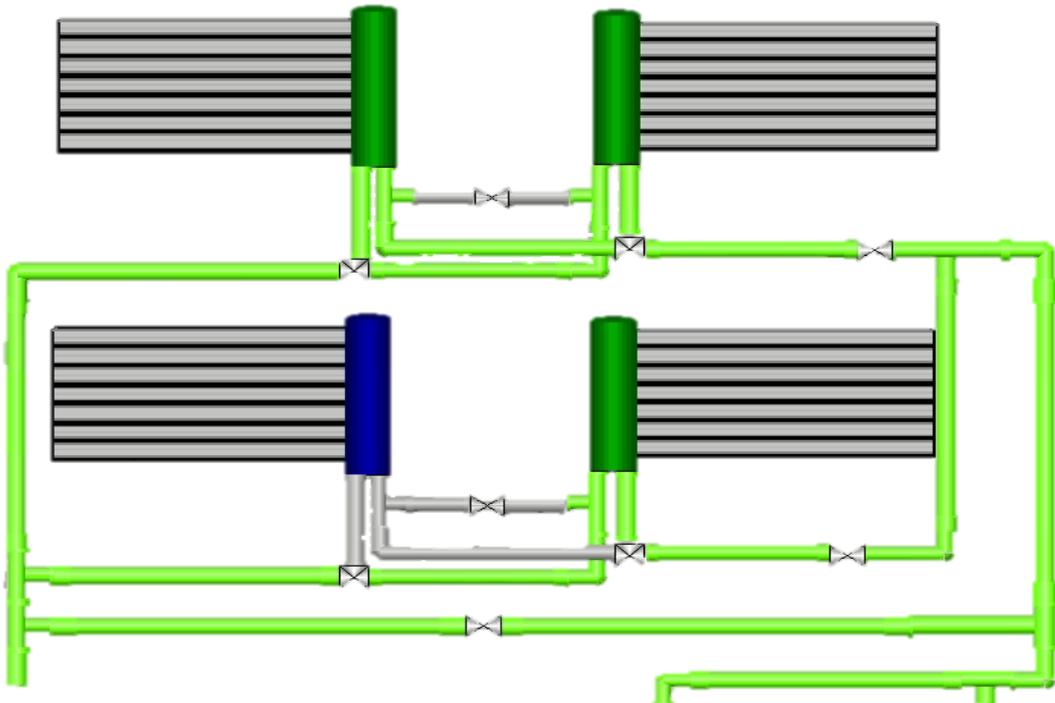


Figura 35. Esquema tres colectores activados

Como se ha mencionado, un instrumento de ambas parejas está conectado por lo que el caudal se dividirá entre la mitad. Adicionalmente, una pareja se encuentra con los dos captadores que la componen encendidos por lo que el caudal que pasa por esta parte de la instalación queda dividido entre dos. Por el tercer colector en funcionamiento, circulará la mitad del caudal inicial ya que su pareja no atravesará un caudal nulo.

Tabla 6. Cálculo de caudal para tres colectores activados

COLECTOR	ESTADO	CAUDAL
1	Encendido	$\frac{1}{4} \dot{m}_{total}$
2	Encendido	$\frac{1}{4} \dot{m}_{total}$
3	Apagado	0

4

Encendido

$$\frac{1}{2} \dot{m}_{total}$$

La situación 3 se repetiría para el resto de los colectores si hay solo uno de los cuatro apagado.

- Los calores de pérdidas (\dot{Q}_p), son valores calculados a lo largo de la tubería por la que circula el fluido caloportador. Aunque la instalación se encuentra aislada térmicamente, sufre una cantidad de pérdidas de calor amplia. Estas pérdidas se pueden cuantificar en dos áreas:

- \dot{Q}_{P1} es el calor perdido desde la salida de los colectores (T_{inP1}) hasta la entrada de los acumuladores (T_{outP1}). El gasto másico utilizado para el cálculo, en este caso, será el total de los acumuladores dado que se considera el inicio de la parte una de las perdidas como el inicio de la salida de los colectores y, por tanto, los caudales que atraviesan cada colector formaran el caudal total. Y la capacidad calorífica del agua será la correspondiente para una temperatura media entre T_{inP1} y T_{outP1} .

La temperatura de salida de los colectores difiere en cada colector, lo mismo sucede con la temperatura de entrada a los acumuladores. Como solución, se interpretó inicialmente que la entrada al área de las perdidas como la media ponderada de las temperaturas de salida de los colectores (Ecuación 19) y la salida del área como la media ponderada de la entrada a los acumuladores (Ecuación 20). Posteriormente, se ha tenido en cuenta también, el caudal que afecta a cada temperatura. De esta manera, se ha obtenido un cálculo más exacto.

Primera forma:

$$\dot{T}_{inP1} = \frac{\dot{T}_{outC1} + \dot{T}_{outC2} + \dot{T}_{outC3} + \dot{T}_{outC4}}{\text{numero de colectores encendidos}} \quad (\text{ec. 18})$$

Forma actual:

$$\dot{T}_{inP1} = \frac{\dot{m}C1 \cdot \dot{T}_{outC1} + \dot{m}C2 \cdot \dot{T}_{outC2} + \dot{m}C3 \cdot \dot{T}_{outC3} + \dot{m}C4 \cdot \dot{T}_{outC4}}{\dot{m}C1 + \dot{m}C2 + \dot{m}C3 + \dot{m}C4} \quad (\text{ec. 19})$$

$$\dot{T}_{outP1} = \frac{\dot{T}_{inLiso} \cdot \dot{m}Liso + \dot{T}_{inAleteado} \cdot \dot{m}Aleteado}{\dot{m}Liso + \dot{m}Aleteado} \quad (\text{ec. 20})$$

De esta manera, se puede obtener el calor haciendo uso de la siguiente formula:

$$\dot{Q}_{P1} = \dot{m}_{Total} \cdot C_p \cdot (\dot{T}_{outP1} - \dot{T}_{inP1}) \quad (\text{ec. 21})$$

- \dot{Q}_{P2} , es calculado con la misma estrategia que en el caso anterior con la peculiaridad de que en esta ocasión, la entrada va referida a la media de la temperatura de salida de los acumuladores y la salida a la temperatura de entrada a los colectores. Para obtener una mayor exactitud, como en el caso anterior, se tiene también en cuenta los caudales que circula por los colectores y acumuladores en cada instante.

$$\dot{T}_{inP2} = \frac{\dot{T}_{outLiso} \cdot \dot{m}Liso + \dot{T}_{outAleteado} \cdot \dot{m}Aleteado}{\dot{m}Liso + \dot{m}Aleteado} \quad (\text{ec. 22})$$

$$\dot{T}_{out}P2 = \frac{\dot{m}C1 \cdot \dot{T}_{inC1} + \dot{m}C2 \cdot \dot{T}_{inC2} + \dot{m}C3 \cdot \dot{T}_{inC3} + \dot{m}C4 \cdot \dot{T}_{inC4}}{\dot{m}C1 + \dot{m}C2 + \dot{m}C3 + \dot{m}C4} \quad (\text{ec.23})$$

- El calor disponible de la instalación, $\dot{Q}disp.$, se obtiene a con el sumatorio de calores calculados previamente

$$\dot{Q}disp = \dot{Q}Ct + \dot{Q}P1 + \dot{Q}P2 \quad (\text{ec. 24})$$

- Por último, el valor restante es la eficiencia de la parafina en el acumulador. Inicialmente, se procedió a su cálculo mediante el cociente de la energía máxima almacenada de la parafina, entre la integral del calor disponible estableciendo sus límites en la zona de carga. Es decir, el primer límite se establece en el momento exacto en el que se obtenga una temperatura de entrada al acumulador mayor a la salida y, el segundo limite cuando suceda lo contrario, una temperatura de salida del acumulador mayor a la entrada.

$$\eta = \frac{maxE}{\int_{t0}^{tf} \dot{Q}dispdt} \quad (\text{ec. 25})$$

Tras reproducir este método de cálculo de eficiencia, se comprobó que en días en los que interceptara una nube afectaba a los límites de integración. Por tanto, el área de integración se reducía, dando lugar a error.

Por esta razón, se optó por realizar un cálculo diferente para la eficiencia, obteniéndose tres formas distintas:

La primera opción considera el máximo de energía almacenada de la parafina entre la integral de calor disponible desde el instante en el que este calor disponible es positivo hasta que su valor es negativo. El máximo de energía almacenada también cumplirá los mismos límites.

$$\eta1 = \frac{(maxE)_{L1}^{L2}}{\int_{L1}^{L2} \dot{Q}dispdt} \quad (\text{ec. 26})$$

La segunda opción se calcula la eficiencia como la energía obtenida en el momento en el que el calor disponible comienza a ser negativo entre la integral del calor disponible. Los límites se mantienen iguales a la opción anterior.

$$\eta2 = \frac{E_{L2}}{\int_{L1}^{L2} \dot{Q}dispdt} \quad (\text{ec. 27})$$

Por último, la tercera opción que se contempla como límites para el área interpretada en la integral como el momento en el que el calor disponible es superior a cero y el momento en el que se alcanza la energía máxima. De esta manera, se entiende esta tercera opción como el cociente entre el máximo de la energía en estos límites entre la integral del calor disponible.

$$\eta3 = \frac{(maxE)_{L1}^{L2'}}{\int_{L1}^{L2} \dot{Q}dispdt} \quad (\text{ec. 28})$$

Tras obtener los resultados, se realizó una comparación entre los tres métodos de estudio el rendimiento, las diferencias entre estos se consideran insignificativas. Como

Capítulo 5. Eficiencia.

decisión se ha optado por la metodología del rendimiento dos. La razón de esta resolución se debe a que en este rendimiento se tiene en cuenta la energía íntegra del intervalo de calor disponible seleccionado, dicho calor recoge la parte del espacio donde el calor es positivo. Se podría inducir error para el cálculo de la eficiencia estimar la energía máxima dentro de esta distancia de calor para determinados ensayos.

6. Ensayos

Como es conocido, los ensayos se encuentran condicionados por las condiciones meteorológicas. En este apartado, se recogen los ensayos realizados desde diciembre hasta mayo variando tanto el número de colectores como el tipo de acumulador, como muestra la Tabla 7.

Tabla 7. Ensayos

FECHA	NÚMERO DE COLECTORES	ACUMULADOR
01/12/2020	3,5	Liso y Aleteado
03/12/2020	3,5	Liso y Aleteado
15/12/2020	3,5	Liso y Aleteado
18/02/2021	2	Liso y Aleteado
23/02/2021	3	Liso y Aleteado
25/02/2021	3	Liso y Aleteado
17/03/2021 (FALLIDO)	1	Liso y Aleteado
23/03/2021	1	Aleteado
24/03/2021	1,5	Aleteado
25/03/2021	2	Aleteado
23/04/2021	2	Liso y Aleteado
24/04/2021 (FALLIDO)	2	Liso y Aleteado
25/04/2021 (FALLIDO)	2	Liso y Aleteado
26/04/2021 (FALLIDO)	2	Liso y Aleteado
28/04/2021	2,5	Liso y Aleteado
29/04/2021	2,5	Liso y Aleteado
30/04/2021	2	Liso y Aleteado
01/05/2021 (FALLIDO)	2,5	Liso y Aleteado
02/05/2021	2	Liso y Aleteado
03/05/2021 (FALLIDO)	2,5	Liso y Aleteado

04/05/2021 (FALLIDO)	2,5	Liso y Aleteado
05/05/2021 (FALLIDO)	3	Liso y Aleteado
06/05/2021	2	Liso y Aleteado
07/05/2021	1	Liso y Aleteado
08/05/2021	1,5	Liso y Aleteado
09/05/2021	1,5	Liso y Aleteado
11/05/2021	2	Liso y Aleteado
12/05/2021 (FALLIDO)	2,5	Liso y Aleteado
14/05/2021	1	Liso y Aleteado
16/05/2021	1	Liso y Aleteado
17/05/2021	1	Liso y Aleteado
18/05/2021	1,5	Liso
20/05/2021 (FALLIDO)	2	Liso
21/05/2021 (FALLIDO)	1	Liso
22/05/2021 (FALLIDO)	3	Liso
23/05/2021 (FALLIDO)	2	Liso
24/05/2021	1,5	Liso
29/05/2021 (FALLIDO)	2,5	Liso y Aleteado
30/05/2021 (FALLIDO)	2,5	Liso y Aleteado

La razón por la que se ha variado tanto el número de colectores como el de acumuladores deriva a un mayor número de ensayos distintos, a partir de los cuales se puede estudiar cómo afecta estas modificaciones a diferentes parámetros.

Como se puede observar en la Tabla 7, algunos ensayos se han clasificado como fallidos. Esto es el resultado del uso de un número incorrecto de colectores, que provoca temperaturas demasiado bajas impidiendo la fusión del PCM o provocando unas temperaturas demasiado elevadas que puede dañar el material. Otro de los fallos habituales que se produce en la instalación, deriva en los caudalímetros cuya medición algunas veces resulta errónea debido a al deterioro de este instrumento.

Entre las características principales que requiere un ensayo válido, se encuentran una curva de irradiancia con el menor número de perturbaciones presentes, durante el proceso de carga debe existir diferencia entre la temperatura de entrada y salida de los colectores, siendo mayor la primera. Además, se debe alcanzar la temperatura de fusión y no superar los 99 °C para no dañar el PCM.

7. Comparaciones

En este apartado, se van a mostrar los distintos resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados.

En un primer caso, se va a mostrar diferentes parámetros comparados entre un día soleado y un día nublado, en los que se trabajó con el mismo número de colectores solares en la misma estación del año.

En segundo lugar, se va a mostrar las curvas de calor captado pertenecientes a un día de los meses ensayados.

Por últimos, se mostrará la curva de calor obtenido de los colectores y el calor realmente disponible tras verse afectado por las pérdidas de la instalación.

7.1. Caso 1

A continuación, se van a comparar y estudiar los diversos parámetros obtenidos a partir de dos ensayos, en los que se empleó dos colectores solares. La diferencia que se puede encontrar a priori es la climatología siendo para uno de ellos favorable y para otro desfavorable. Adicionalmente, ambos ensayos se han realizado en la misma estación del año.

El primer parámetro que se analizará va a ser la irradiancia:

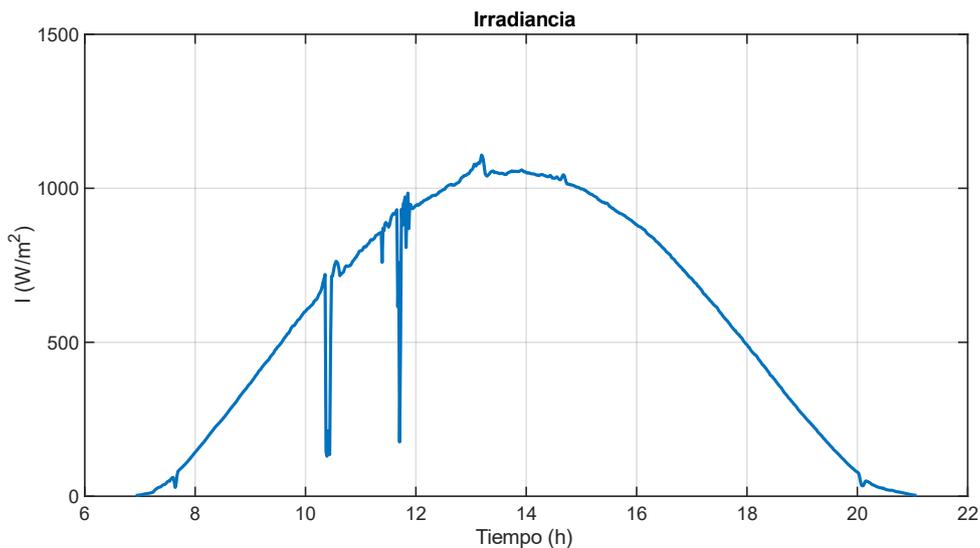


Figura 36. Curva de irradiancia día 11/05/2021.

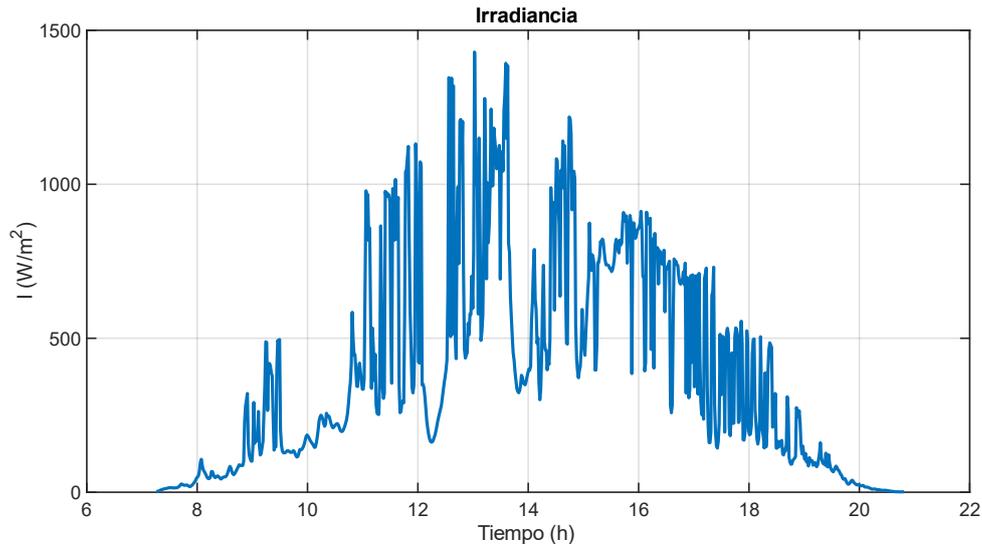


Figura 37. Curva de irradiancia día 23/04/2021.

La irradiancia es un parámetro fundamental con el que se puede obtener una primera hipótesis sobre la validez del ensayo realizado.

La Figura 36 muestra una irradiancia muy similar a la campana de Gauss característico de un día muy soleado y, por la tanto, a priori supone un ensayo efectivo. Se puede observar un pico máximo sobre las 14:00 h donde el parámetro que estamos midiendo obtiene un valor de 1100 W/m^2 aproximadamente, al igual que varios picos que difieren de la tendencia de la curva. Estos picos son el reflejo de la aparición de nubes en ciertos instantes de la realización del ensayo.

En la Figura 37, se puede observar que la curva no sigue ninguna tendencia por el tiempo tan impredecible que se tuvo ese día. Aunque fue un ensayo muy afectado por la presencia de nubes, la irradiancia consigue alcanzar valores superiores a la figura anteriormente comentada. Estos valores ascienden a una cifra cercana 1500 W/m^2 y oscilan durante el intervalo de entre las 12:00 h y las 15:00 h, siendo este el mismo rango de tiempo en el que los valores de la figura anterior también alcanzan sus valores máximos. Este factor causará unos efectos tanto en la fracción líquida como en la energía como se verá a continuación.

Aunque en la segunda figura se alcanza valores mayores, no va a influir de igual manera que la irradiancia por parte de la primera figura. Esto se debe a que mientras que en la primera el rango de valores obtenidos es inferior, la curva sigue una tendencia favorable para la fusión de la parafina, en cambio, esto no ocurre en el otro ensayo por la ausencia de esta curva que impide una fusión progresiva del PCM.

La irradiancia y la estación del año también influyen en el número de colectores necesarios, dado que, a mayores valores de irradiancia, la superficie de absorción necesaria se reduce y, por lo tanto, menor número de captadores solares serán necesario. En meses más fríos como diciembre, el número de colectores será superior a meses de verano para aumentar más la temperatura del fluido caloportador.

Seguidamente, se muestra la fracción líquida perteneciente a ambos ensayos:

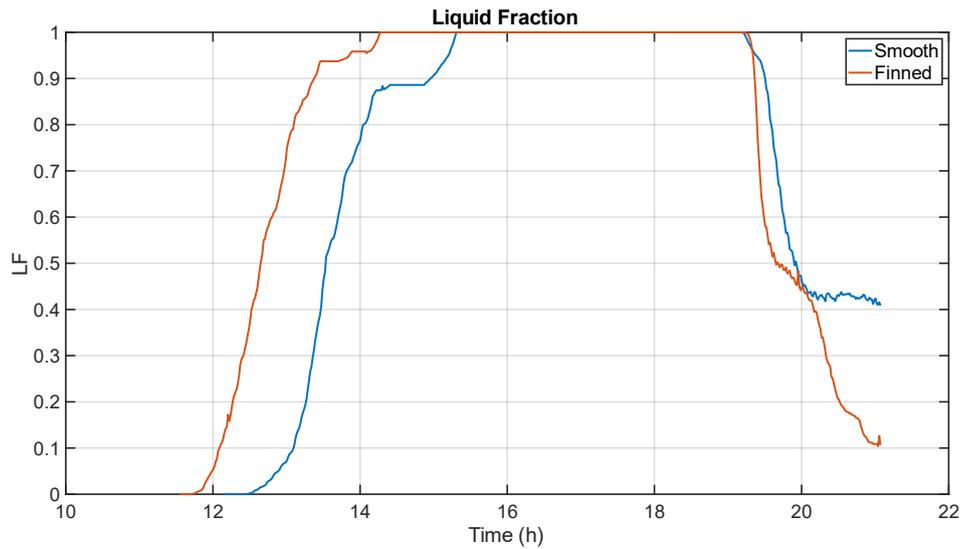


Figura 38. Curva de fracción líquida día 11/05/2021.

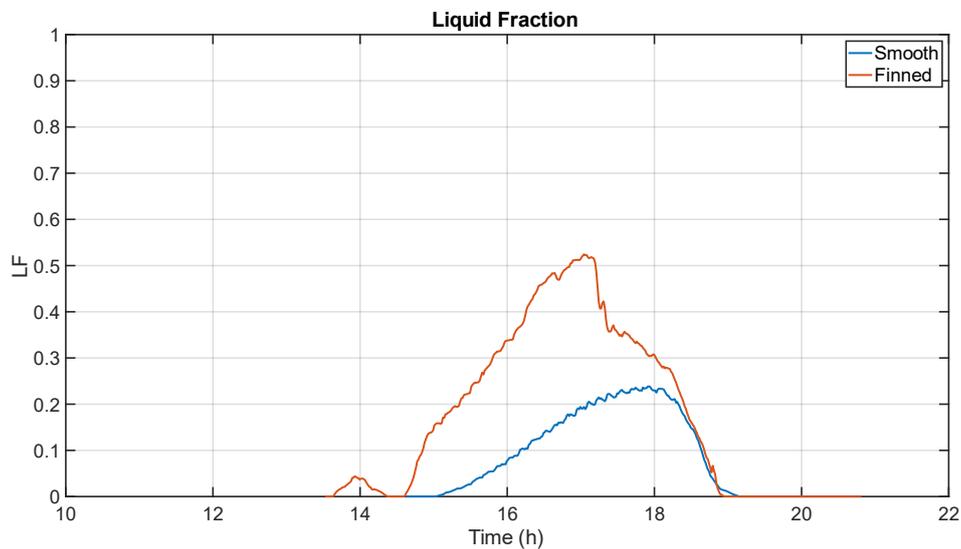


Figura 39. Curva fracción líquida 23/04/2021.

En la Figura 38, se puede ver que la parafina se ha fundido toda, alcanzando un valor de la unidad tanto el acumulador liso como el aleteado. Se puede observar que la disponibilidad de aletas adelanta la fusión del PCM una hora aproximadamente (en el proceso de carga), puesto que como se ha visto en los estudios bibliográficos analizados, las aletas mejoran la transferencia de calor.

Una vez alcanzado el valor máximo en ambos acumuladores se puede observar una meseta que se prolonga hasta las 18:30 h para ambos casos. Posterior a la meseta, la parafina empieza a solidificarse de nuevo, es entonces cuando la configuración de aletas de nuevo favorece el proceso de descarga.

En la Figura 39, se observa que se ha iniciado la fusión de la parafina. Debido a las condiciones no se funde todo el volumen de PCM. Este suceso es razonable, puesto que la curva de

irradiancia ha fluctuado en gran medida, impidiendo un calentamiento del fluido caloportador progresivo, así como una fusión completa del material.

Para el acumulador aleteado, se ha alcanzado una fracción líquida del 50% mientras que en el acumulador liso un valor de 20%. Se puede apreciar una gran ventaja con la configuración de acumulador aleteado, dado que se logra fundir aproximadamente el doble de parafina que con el acumulador liso siendo estos valores muy bajos comparados con la figura anterior. En este caso, no existe una estabilidad de la parafina fundida dado que se alcanza el punto cumbre a una hora tardía donde la temperatura de entrada a los acumuladores empieza a disminuir.

En este ensayo, se pueden apreciar con mayor exactitud las diferencias, así como ventajas de la función de las aletas. En comparación ambos ensayos, se demuestra que a irradiancias y por lo tanto calores altos, ambos colectores se comportan de la misma manera, siendo la actuación del acumulador liso más lenta. En cambio, a bajos valores se demuestra una mejoría bastante significativa el uso de aletas en el acumulador.

En el ensayo del día 11 de mayo se puede ver que, en el acumulador aleteado, el PCM empieza a fundir sobre las 11:45 h cuando la irradiancia alcanza valores cercanos a 900 W/m^2 mientras que el acumulador liso sobre las 12:10 h cuando los valores son de 1000 W/m^2 . En el ensayo del día 23 de abril, el acumulador aleteado empieza a fundirse la parafina a las 13:30 h, correspondiente a cuando la irradiancia obtiene los valores más altos, y el acumulador liso sobre las 14:30 h. Como se ha comentado, estas diferencias de horas son el resultado de que el fluido caloportador, en nuestro caso agua, no haya sido calentado de forma progresiva, retrasando la hora de fundir el PCM. Se comprueba de este modo, la importancia de una curva de irradiancia que siga una trayectoria limpia.

Además de la fracción líquida, también es interesante el estudio de la energía almacenada en ambos acumuladores:

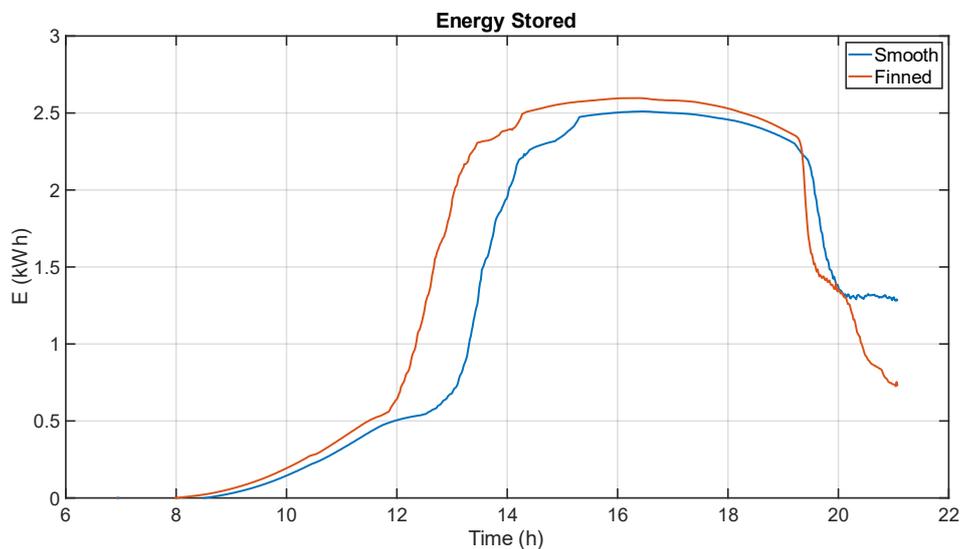


Figura 40. Curva energía almacenada día 11/05/2021

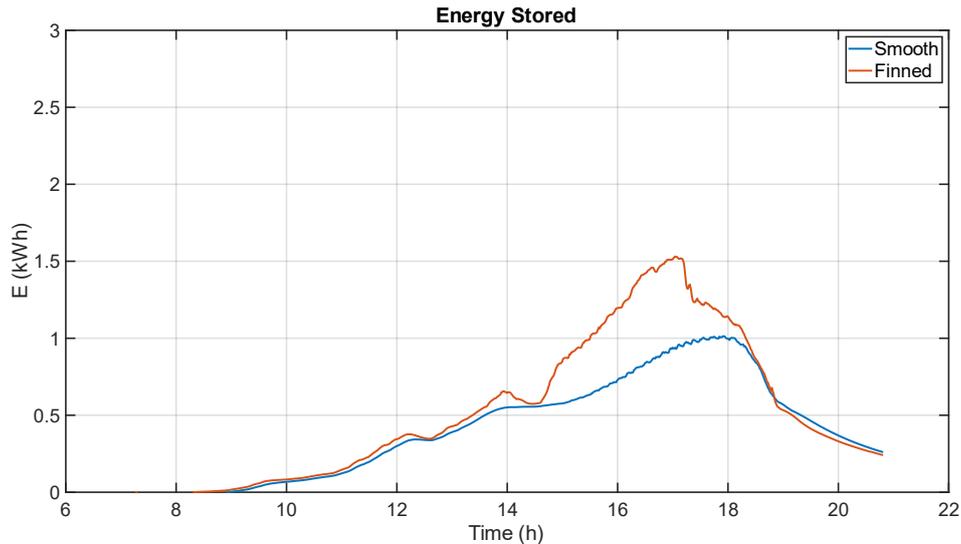


Figura 41. Curva energía almacenada día 23/04/2021

Al igual que durante el estudio de la fracción líquida, se puede observar que en un ensayo nublado se obtiene la mitad de energía que en un día soleado.

En el caso de la Figura 40, se puede ver cierta subida pronunciada sobre las 12:00 h para el acumulador aleteado y 13:00 h para el liso, dicha hora coincide cuando el PCM empieza a fundirse de manera acelerada, como se ha visto en las Figura 38 y Figura 39. Posteriormente, la curva alcanza cierta estabilidad con unos valores de 2,5 kWh donde el PCM en estado fundido, es decir, sobre las 15:00 h. El descenso de la curva, también es coincidente con la de la fracción líquida ya que la energía como se ha visto en el Apartado 4.4. tiene en cuenta la parte sólida y fundida del PCM.

En la Figura 41, no se aprecia un crecimiento de la energía pronunciado de la energía en ninguno de los dos acumuladores, debido a que la fundición del PCM se produce de forma discontinua y lentamente. A su vez, se puede observar que la energía del acumulador aleteado es ligeramente superior en comparación con el otro acumulador. En cambio, una vez que alcanza el nivel máximo que ha podido conseguir su descenso es rápido. Esto sucede cuando la temperatura de entrada al acumulador es menor que la de salida lo que hace que el PCM se vaya enfriando.

Además, se producen pérdidas al medio ambiente por estar este a menor temperatura lo que ayuda a una solidificación de la parafina acelerada.

A continuación, se muestra el calor obtenido por los acumuladores en ambos ensayos.

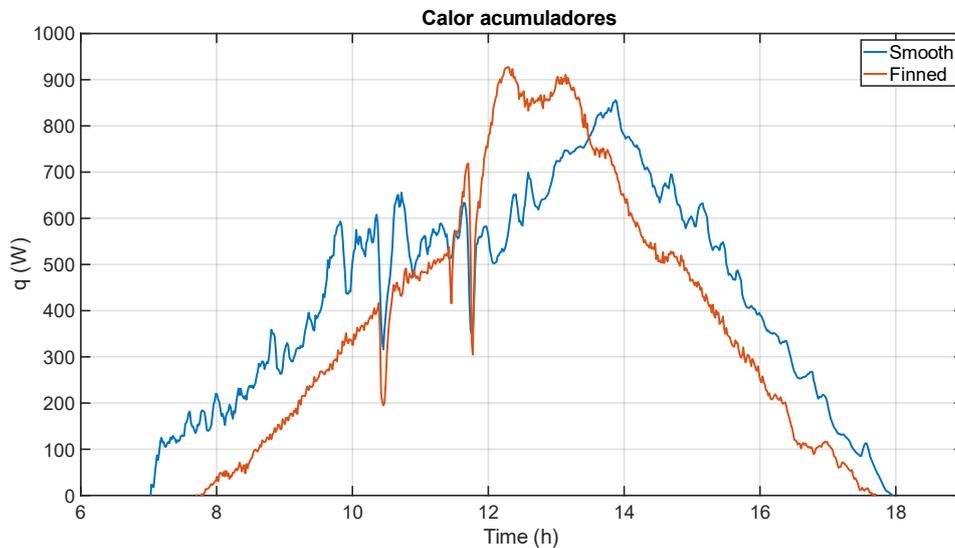


Figura 42. Curva de calor 11/05/2021

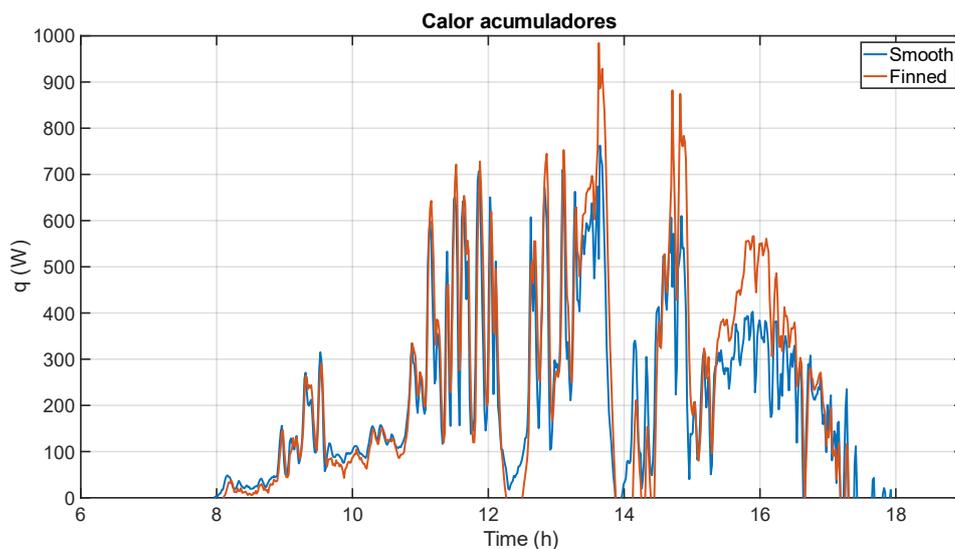


Figura 43. Curva de calor 23/04/2021

En cuanto al calor obtenido tanto en la Figura 42 como en la Figura 43 se puede observar que, en el intervalo del proceso de carga, rango desde el inicio de la mañana hasta 14:00 h aproximadamente, el calor obtenido por el acumulador de liso es superior al que posee el acumulador aleteado. El resultado que se debería haber obtenido correspondería a unos valores de calor superiores para el acumulador de aletas. Esto no es lo obtenido debido a que tanto la temperatura de entrada al acumulador liso, como el caudal fue ligeramente superior. En cambio, se observa la presencia de un aumento de la curva sobre las 12:00 h coincidente a la hora en la que el PCM del acumulador aleteado empezaba a fundir, como se ha visto durante el estudio de la fracción líquida.

Capítulo 7. Comparaciones.

Además, estos picos coinciden cuando la irradiancia alcanza la cima de su curva, posiblemente la razón de la aparición de tramos de valores elevados en las gráficas de calor.

A continuación, se estudiará el calor por unidad de superficie y sus consecuencias:

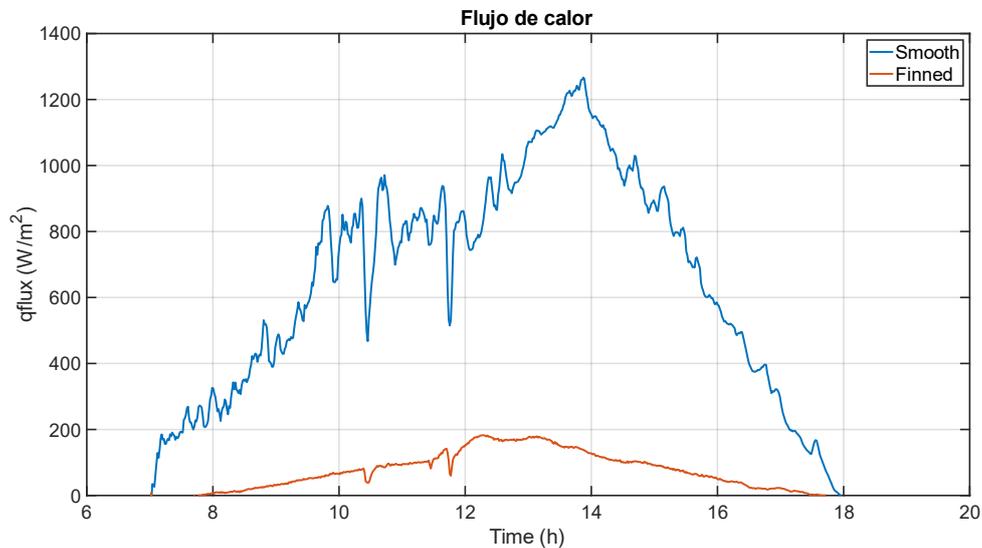


Figura 44. Calor por unidad de superficie 11/05/2021

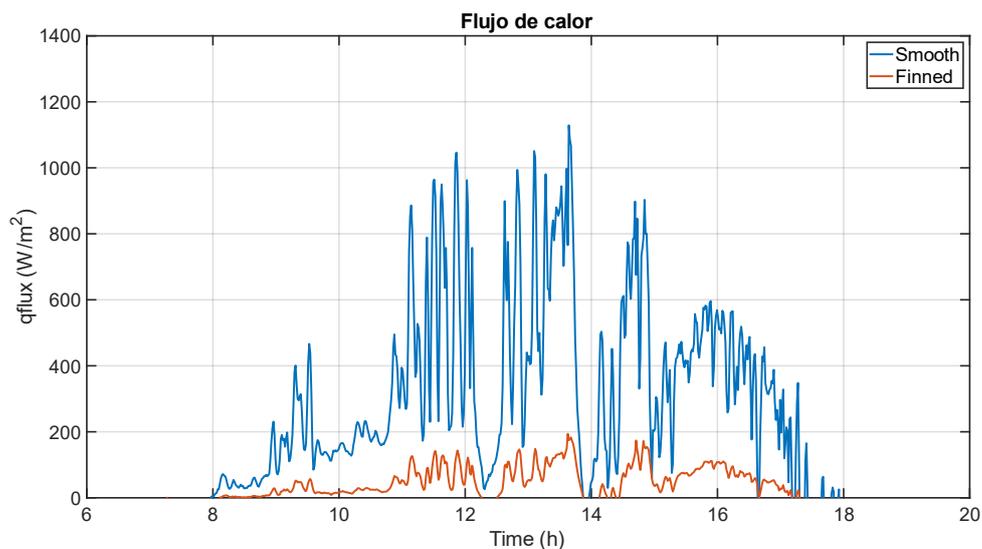


Figura 45. Calor por unidad de superficie 23/04/2021

A simple vista, se puede apreciar que los valores de pertenecientes al acumulador aleteado difieren mucho respecto a los del liso. Mientras que al acumulador liso posee valores que alcanza los 1200 W/m^2 , el otro intercambiador no supera los 200 W/m^2 . Esto se debe a que la sección empleada en el cálculo de este parámetro en el caso del acumulador liso se ha tenido en cuenta el área de los tubos y los codos que se localizan en el interior de este. En cambio, la superficie tomada en el acumulador aleteado es superior, dado que además de las superficies nombradas, se adiciona el área de cada aleta que poseen los tubos. De este modo, el área empleada para este último se encuentra entre 4 y 5 veces superior al del acumulador liso.

Si se tuviera en cuenta la misma superficie de transmisión en ambos intercambiadores, el resultado sería similar a la Figura 42 y Figura 43, donde la curva de calor obtenida para el acumulador aleteado sería superior.

Esto causará obtener valores menores de coeficiente de convección y, de Nusselt para el acumulador aleteado como se verá a continuación.

Tanto en las figuras en las que se representan el calor como el flujo de calor, se observaban unas curvas no uniformes en el día nublado fruto de la irradiancia. Este efecto además provoca que se obtengan valores menos de 0,5 en la fracción líquida, es decir, aproximadamente el 50% del PCM de los acumuladores se encuentra en estado sólido. Por estos motivos, carece de importancia el estudio del coeficiente de película, Nusselt y Rayleigh y basaremos estos estudios en días soleados donde la fracción líquida supere la mitad del volumen de la parafina.

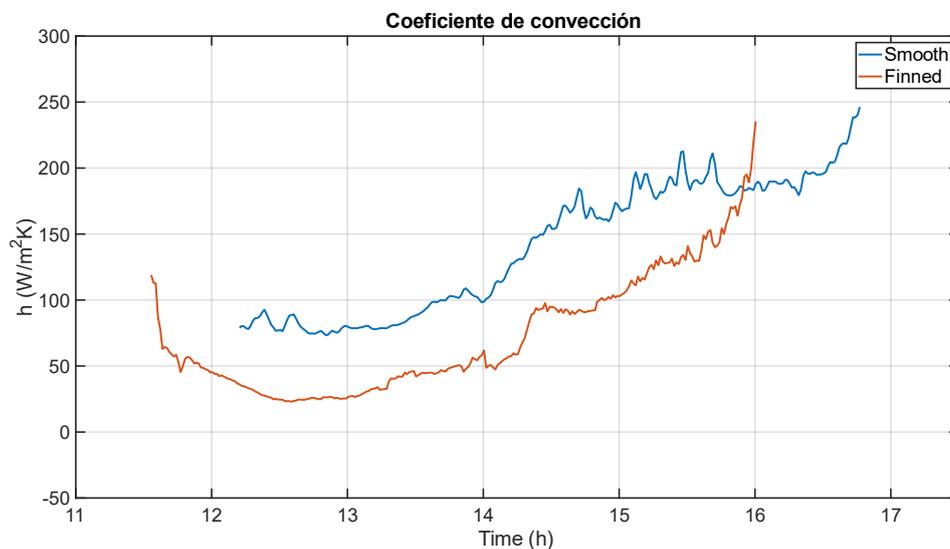


Figura 46. Curvas coeficiente de convección día 11/05/2021

Como se puede apreciar en la Figura 46 el coeficiente convectivo del acumulador liso es superior con respecto al aleteado. Como se ha comentado en las figuras de calor por unidad de área, se confirma el efecto de este sobre el coeficiente convectivo.

Se puede observar unas curvas que mantienen una trayectoria uniforme, esto es debido, como se ha mencionado varias veces, a la irradiancia, puesto que una irradiancia menos uniforme causa mayor número de perturbaciones en los parámetros obtenidos.

Cuando los valores de las temperaturas de entrada y salida de los acumuladores se aproximan entre sí, el resultado es la obtención de valores muy elevados. Es por esta razón por la que se puede observar unos valores ascendentes en la Figura 46 tanto en la curva correspondiente al acumulador liso como al aleteado.

Una vez estudiado el coeficiente de película, se puede proceder al estudio del número de Nusselt en los mismos ensayos.

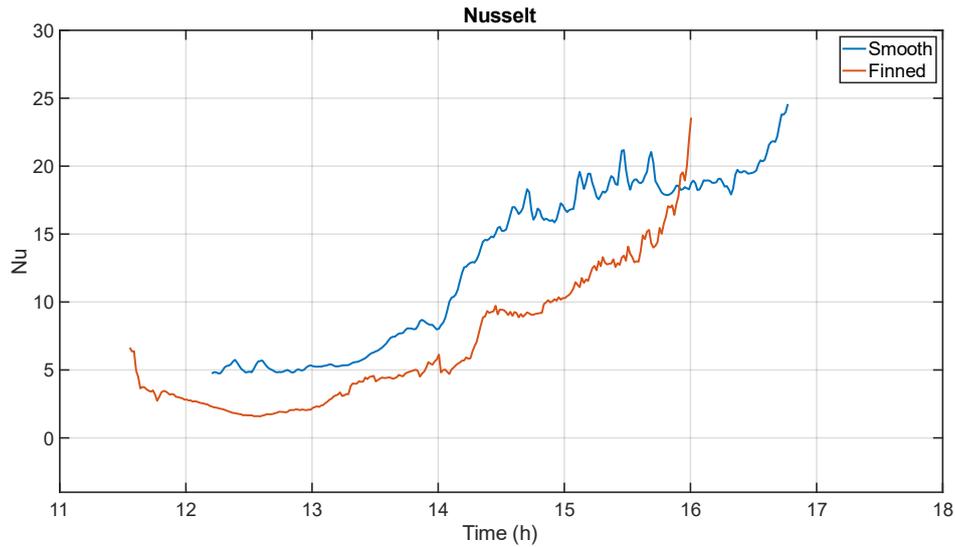


Figura 47. Representación gráfica de Nusselt 11/05/2021

Se puede observar que el número de Nusselt sigue la misma tendencia que el coeficiente de película.

Los valores del número de Nusselt obtenidos para el acumulador aleteado son menores que los obtenidos para el liso, al igual que ocurría en el estudio del coeficiente convectivo. Esto se debe a que el coeficiente de convección es directamente proporcional a Nusselt y el diámetro del tubo por el que circula el agua tomado para el calculo de ambos acumuladores son idénticos.

Como ya se comentó antes, durante la fusión la transferencia de calor se realiza por conducción y convección. La adición de las aletas genera que el calor aportado por conducción sea mayor que en el tubo liso. Esta mejora provoca que la convección natural cobre mayor importancia en el acumulador liso durante el proceso de fusión

Este hecho, queda demostrado con la evaluación de los números de Rayleigh en ambos acumuladores, mostrados en la Figura 48.

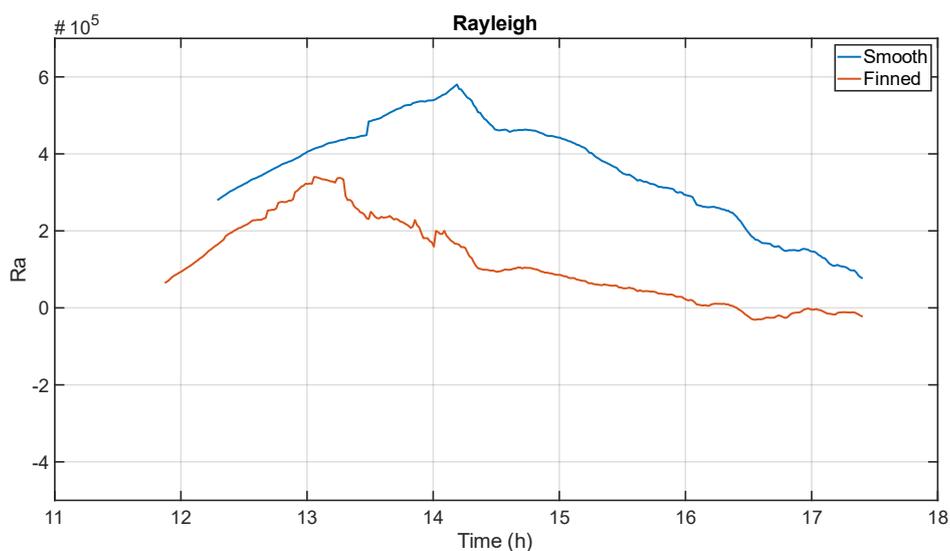


Figura 48. Representación gráfica del número de Rayleigh.

En la Figura 48, se comprueba que efectivamente la transferencia de calor por convección natural es mayor en el acumulador liso, como indican los mayores valores del número de Rayleigh.

En ambas curvas, se puede ver en primer lugar una subida del número de Rayleigh debido a que el PCM comienza a fundirse. Por este motivo, se puede observar que la curva del acumulador aleteado comienza antes que la del liso dado que como se veía en la fracción líquida este proceso empezaba con anterioridad.

Posteriormente, los valores de Rayleigh descienden cuando el PCM se encuentra en su totalidad fundido y los flujos de calor disminuyen, puesto que no hay cambio de fase. Además, coincide la diferencia de temperaturas entre PCM y pared de tubos decrece.

7.2. Caso 2

A continuación, se observan distintas curvas de calor obtenido por los colectores para ensayos con una meteorología favorable con distinto número de colectores.

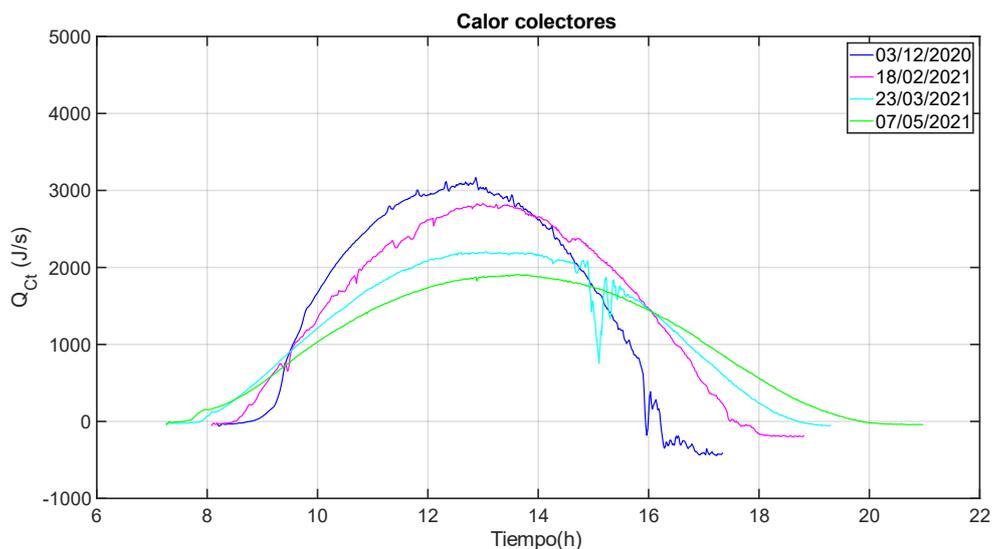


Figura 49. Calor colectores días soleados

Los ensayos mostrados en la Figura 49 fueron ensayados con distinto número de colectores. El ensayo del mes de diciembre se ensayó con 3,5 colectores, el de febrero con dos colectores y los otros dos ensayos con 1 colector.

Se observa que existe cierta independencia con la estación del año que se realice el ensayo, ya que se pueden obtener valores de calor captado mayores aumentando el número de colectores. Si bien, la estación del año en la que se realicen los ensayos determinará la duración de los mismos debido a que la cantidad de horas de luz varía.

En consecuencia, se puede ajustar el número de colectores solares para obtener una cantidad de calor captado deseado, sabiendo que en los meses de verano se necesitarán un menor número de los mismos.

Dado que los colectores son capaces de calentar el agua que fluye por las tuberías de la instalación gracias a la irradiación, las curvas obtenidas del calor de los colectores son coincidentes con las obtenidas con las curvas de las irradiancias. Esta es la causa por la que en esta figura se observan algunos de picos u oscilaciones en las curvas.

Como se verá posteriormente, el calor obtenido por los colectores solares no es aprovechado en su totalidad por la instalación debido a pérdidas en el sistema.

7.3. Caso 3

En este caso se estudiará el calor final del que disponen los acumuladores para fundir la parafina mediante un ensayo en el que las condiciones meteorológicas fueron favorables.

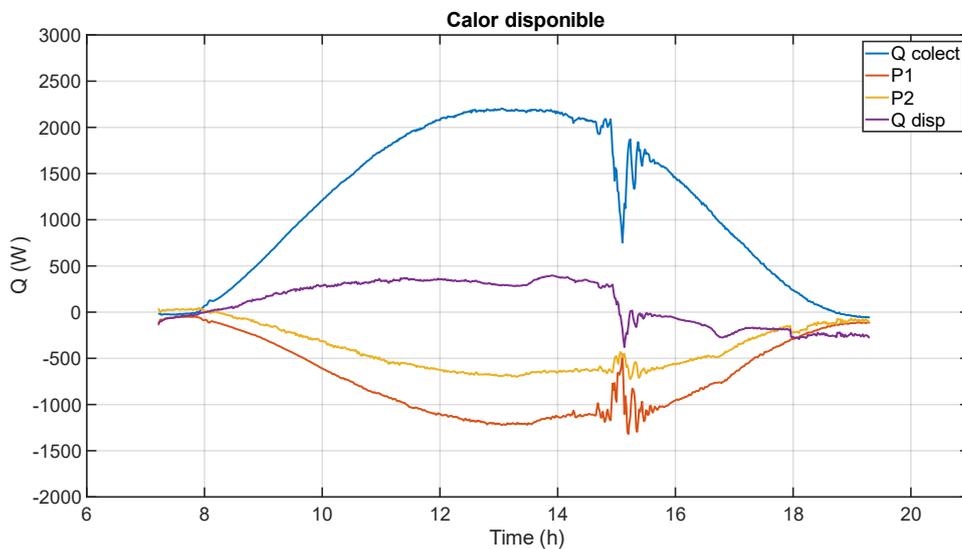


Figura 50. Calor disponible día 23/03/2021

Como se puede observar en la Figura 50 aparecen cuatro curvas. El calor procedente de los colectores es la curva con valores más altos. Debido a un mal aislamiento, las pérdidas disminuyen la mitad de este calor y, por lo tanto, el calor aprovechado por la instalación corresponde a menos de la mitad del calor primario.

Las curvas que representan las pérdidas uno es superior a las pérdidas dos, esto es la causa de la temperatura del agua que circula por cada parte del sistema, siendo mayor la perteneciente a las primeras. De esta manera, la diferencia de calor entre el agua circulante y la temperatura ambiental es superior en la zona de pérdidas uno que en las pérdidas dos. En consecuencia, la transmisión de calor hacia el ambiente se ve favorecida y las pérdidas crecen.

Por último, la curva que respresenta el calor disponible, como se ha mencionado anteriormente es el calor que la instalación le transmite a los acumuladores para conseguir fundir la parafina. Esta curva se obtiene de la resta del calor de los colectores menos las pérdidas uno y dos.

Para finalizar, de 7:00 h hasta 8:00 h se obtienen valores negativos de calor de los colectores como consecuencia de unas temperaturas bajas al amanecer de ambos ensayos. Esto ocurre

también al finalizar el día a partir de las 19:00 h. En ambos periodos, el acumulador no dispone del calor necesario para calentar el PCM.

El valor de la curva del calor procedente a los colectores es dependiente de la irradiancia del día ensayo así como de los colectores que se hayan empleado, en cambio, el valor de las pérdidas es independiente a este y se obtienen valores similares en todos los ensayos.

7.4. Resultados eficiencia

A continuación, se van a mostrar en la Tabla 8 los resultados que se han obtenido tras aplicar los cálculos del Apartado 5

Tabla 8. Valores mensuales de calor disponible y rendimientos liso y aleateado

MES	CONDICIONES METEOROLÓGICAS	CALOR DISPONIBLE	REND. LISO	REND. ALETEADO
DICIEMBRE	Soleado	6,517	0,689	0,742
	Soleado	6,079	0,661	0,756
	Parcialmente soleado	5,759	0,610	0,714
FEBRERO	Soleado	6,113	0,607	0,696
	Completamente nublado	5,006	0,470	0,798
	Completamente nublado	3,958	0,402	0,534
MARZO	Soleado	1,940	-	0,568
	Algo nubloso	3,218	-	0,713
	Parcialmente soleado	4,358	-	0,602
ABRIL	Completamente nublado	4,663	0,416	0,567
	Algo nubloso	8,417	0,584	0,591
	Parcialmente soleado	8,839	0,570	0,588
	Algo nubloso	6,531	0,654	0,709
MAYO	Soleado	8,617	0,566	0,572
	Soleado	9,152	0,541	0,547
	Soleado	4,474	0,351	0,490
	Soleado	7,268	0,625	0,671
	Soleado	6,653	0,638	0,682
	Soleado	9,182	0,537	0,554
	Soleado	4,076	0,586	-

En la Figura 51, se representa los valores anteriores para obtener una mejor visualización de estos:

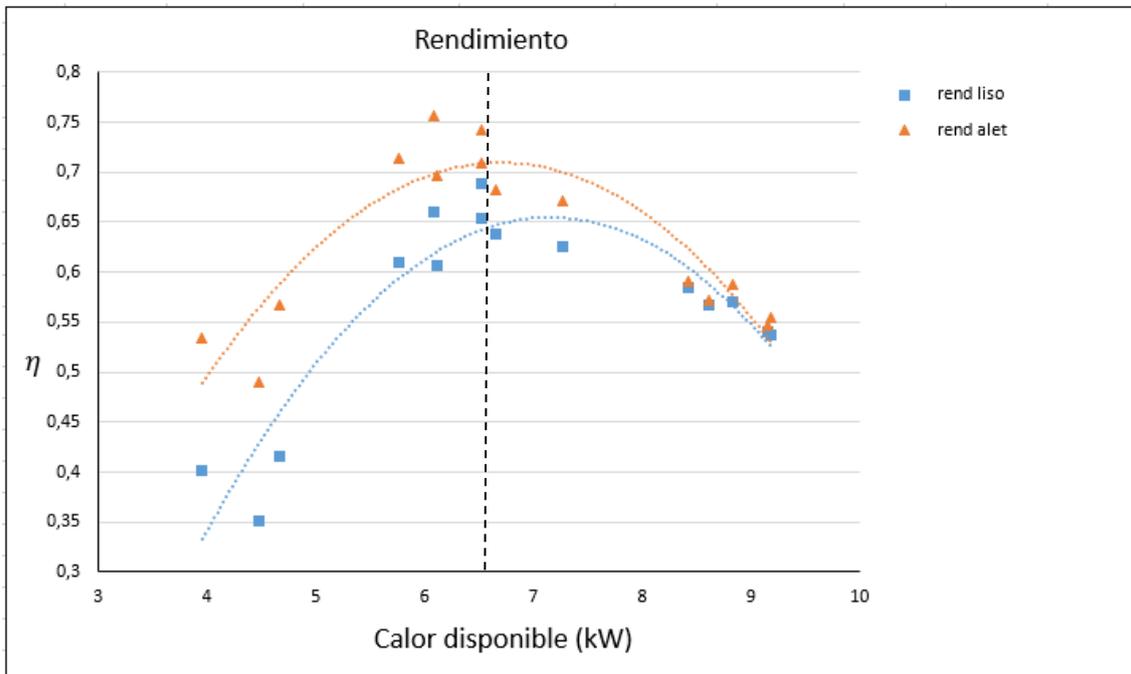


Figura 51. Rendimiento

Se puede distinguir que a valores bajos de calor disponible se obtiene mayor rendimiento para el acumulador aleteado en comparación con el acumulador liso. Esto muestra que la adición de aletas favorece la transferencia de calor y como resultado obtener mayor cantidad de PCM fundido. Dicha ventaja se puede apreciar que corresponde a una diferencia de 25% aproximadamente, a favor del acumulador aleteado.

A valores medios de calor se puede observar que la adición de aletas es menos significativa. Se distingue una superioridad de 10% respecto al acumulador liso. Los resultados obtenidos tanto para el acumulador de aletas como el liso se aproximan entre sí. No obstante, se sigue contemplando una ventaja por parte de las aletas gracias a la mejorada transferencia de calor.

Por último, se observa una última zona correspondiente a valores altos de calor disponible donde se puede asumir como nulo el efecto de aletas en cuanto al rendimiento que se puede obtener, puesto que se obtienen los mismos resultados empleando ambos acumuladores.

En una visualización global de la Figura 51, se puede observar una cierta relación entre calor disponible empleado en la fusión del PCM con respecto al rendimiento obtenido hasta valores de 7 kW de calor. En cambio, a valores superior a 7 kW, la eficiencia obtenida se reduce. Esto se debe a que, a valores altos, la instalación no es capaz de asumir la gran cantidad de calor, es decir, el PCM es capaz de fundirse, pero se desperdicia más calor al exterior.

En la búsqueda de un rendimiento óptimo destaca el rango de 5-7 kW debido a que se obtiene un gran rendimiento en ambos acumuladores y los valores de calor disponible no son excesivamente altos.

Como se ha comentado, tanto los rendimientos pertenecientes al acumulador de aletas como para el acumulador liso, se puede observar cierta tendencia dependiendo del calor disponible

en la instalación. Dichas tendencias vienen dadas por dos ecuaciones siendo la ecuación 29 correspondiente al acumulador aleteado y la ecuación 30 al acumulador liso.

$$\eta_{alet} = -0,0292Qdisp^2 + 0,3921Qdisp - 0,6047 \quad (\text{ec. 29})$$

$$\eta_{lis} = -0,0315Qdisp^2 + 0,4508Qdisp - 0,9582 \quad (\text{ec. 30})$$

Donde η corresponde al rendimiento y $Qdisp$ es la integral del calor utilizado para el calentamiento del fluido caloportador en el rango donde este es positivo.

8. Estudio de los beneficios de superficies aleteadas en LTES

En este apartado se realiza un análisis de las mejoras introducidas por la superficie aleteada y su potencial aplicación para el almacenamiento de energía solar térmica en el sector residencial. Asimismo, se cuantifica la mejora y se estudia la influencia en el número de captadores necesarios para el acumulador aleteado en comparación con un acumulador de tubos lisos.

Como se ha podido observar en el Apartado 6, las variables estudiadas para el acumulador aleteado han mostrado un mejor comportamiento frente al acumulador liso. Un aspecto para destacar, se considera la fracción líquida, donde se ha comprobado que el dispositivo aleteado es capaz de fundir más rápido en días favorables y, mayor cantidad en días desfavorables o en los que el calor disponible ha sido bajo respecto al acumulador liso.

Por esta razón, se ha llevado a cabo este apartado donde uno de los objetivos es determinar si resulta más conveniente poseer en la instalación un menor número de colectores y agregar aletas al acumulador o disponer de mayor número de colectores y acumulador tipo liso con la desventaja de obtener menores rendimientos.

Para llevar a cabo este estudio se ha considerado una instalación en la que el acumulador se conecta directamente a los colectores. Es decir, no se tiene en cuenta las pérdidas derivadas de un mal aislamiento en tuberías u otras instrumentaciones. Además, se ha estandarizado a partir de los ensayos disponibles realizados durante este trabajo fin de estudios.

La energía de la parafina se ha calculado mediante la ecuación:

$$E_{parafina} = \rho_L \cdot V \cdot C + C_p \cdot V \cdot (\rho_S \cdot (62 - T_0) + \rho_L \cdot (T_f - 77)) \quad (16)$$

Donde ρ_L es la densidad en estado líquido de la parafina, V es el volumen de parafina, C es la capacidad de acumulación de calor, C_p es el calor específico, ρ_S es la densidad en estado sólido de la parafina y, por último, T_0 y T_f corresponde a la temperatura media inicial y final de la parafina. Los valores de 62 °C y 77 °C son proporcionados por el fabricante que recoge el rango de temperaturas donde se produce la combinación de calor latente y sensible.

Se ha considerado una temperatura media inicial de la parafina de 17 °C y una temperatura media final de 77 °C. El volumen de parafina disponible en los acumuladores liso y aleteado es de 30 L y el resto de los parámetros han sido obtenidos de la Tabla 3 de propiedades de la parafina del Apartado 2.3.

En cuanto a valor medio de rendimiento, se ha realizado una media de los rendimientos cuyo calor disponible corresponde a 7 kW. Se ha tomado dicho valor para obtener la mayor eficiencia posible. Como se ha visto en la Figura 51, existe un máximo en la curva de ambos rendimientos correspondiente a la cantidad de calor citado. Por esta razón, para la pareja de los acumuladores, el valor de eficiencia respectivo para todos los meses del año es idéntico. Como

resultado, se obtiene que el rendimiento para el acumulador liso es 0,660 y para el acumulador aleteado corresponde a 0,711.

El área que requieren ambos acumuladores se ha obtenido relacionando la energía de estos, un tiempo medio desde que amanece hasta que anochece y la irradiancia media de cada mes.

Las horas del día se han obtenido de la web “Sunrise and Sunset” [39] en la que figuran las horas de salida y puesta de sol, a su vez que la duración del día de la mayoría de las ciudades del mundo. En este estudio se ha selecciona la ciudad de Cartagena dentro de la provincia de Murcia de España.

A través del Programa de Capacitación en Percepción Remota Aplicada de la NASA (ARSET) se puede indicar tanto la latitud y longitud de la ubicación deseada y así se consigue la meteorología (humedad, temperatura, viento), características para aplicaciones solares térmicas, irradiancia, parámetros de infrarrojos térmicos y el índice de claridad de la insolación [40].

En esta investigación, se han empleado los datos de irradiancia con el fin de obtener unos valores de irradiancia medios para cada mes.

En la Tabla 9 se muestran los de la superficie de captación que necesita cada acumulador para fundir el PCM.

Tabla 9. Área requerida para acumular liso y aleteado

MESES	IRRADIANCIA (W/M²)	CALOR AC. LISO (W)	CALOR AC. ALETEADO (W)	ÁREA AC. LISO (M²)	ÁREA AC. ALETEADO (M²)
ENERO	247,939	384,256	356,852	1,550	1,439
FEBRERO	299,885	352,163	327,047	1,174	1,091
MARZO	354,221	316,508	293,934	0,894	0,830
ABRIL	385,814	287,110	266,633	0,744	0,691
MAYO	455,124	266,234	247,247	0,585	0,543
JUNIO	498,928	256,877	238,557	0,515	0,478
JULIO	489,191	261,684	243,021	0,535	0,497
AGOSTO	476,238	279,268	259,351	0,586	0,545
SEPTIEMBRE	406,437	305,720	283,916	0,752	0,699
OCTUBRE	357,904	339,045	314,864	0,947	0,880
NOVIEMBRE	261,477	374,668	347,947	1,433	1,330
DICIEMBRE	241,855	398,813	367,584	1,636	1,520

Capítulo 9. Conclusiones

Una vez obtenida la superficie necesaria para fundir el PCM respectivo de cada acumular se le aplica el rendimiento de los colectores, en este caso, de colectores de tubo vacío que son los que dispone la instalación donde se han realizado los ensayos.

La ecuación que regula la eficiencia de este tipo de captadores se encuentra en la Tabla 1 del Apartado 2.1.1.

$$\eta = 0,54 - 1,1158 \cdot T^* - 0,005 \cdot T^{*2} \cdot G \quad (\text{ec. 17})$$

Donde G es la irradiancia y T* se define como:

$$T^* = \frac{T_{\text{fluido}} - T_{\text{amb}}}{G} \quad (\text{ec. 18}) [11]$$

$$T_{\text{fluido}} = \frac{T_{\text{Salida}} + T_{\text{Entrada}}}{2} \quad (\text{ec. 19}) [41]$$

Donde T_{fluido} es la temperatura media de entrada y salida del fluido por el paso de los colectores (ec. 19) y T_{amb} corresponde a la temperatura ambiente media.

Posteriormente, se obtiene el número de tubos necesarios para cada colector. Sabiendo que el área de cada tubo de vacío es 0,1255 m² y que cada colector, de área de absorción es 3,03 m², posee 24 tubos.

Los resultados obtenidos de este proceso matemáticos se muestran en la Tabla 10:

Tabla 10. Número de colectores para acumulador liso y aleteado

MESES	T*	REND. COLECTOR	ÁREA COLECT. AC. LISO	ÁREA COLECT. AC. ALET.	Nº APROX. TUBOS AC.LISO	Nº APROX. TUBOS AC.ALET
ENERO	0,177	0,271	5,724	5,316	46	43
FEBRERO	0,137	0,327	3,593	3,337	29	27
MARZO	0,116	0,356	2,513	2,334	20	19
ABRIL	0,100	0,379	1,962	1,822	16	15
MAYO	0,074	0,415	1,409	1,309	12	11
JUNIO	0,059	0,437	1,179	1,095	10	9
JULIO	0,053	0,445	1,201	1,116	10	9
AGOSTO	0,054	0,445	1,319	1,225	11	10
SEPTIEMBRE	0,075	0,416	1,807	1,678	15	14
OCTUBRE	0,099	0,381	2,486	2,308	20	19
NOVIEMBRE	0,146	0,316	4,530	4,207	37	34
DICIEMBRE	0,174	0,277	5,916	5,494	48	44

Para una mayor comparativa también se ha realizado el estudio teniendo en cuenta el mismo modelo de captador solar, pero con diferente superficie y, por lo tanto, distinto número de tubos que componen este. Según la ficha técnica del fabricante [42], dado que poseen distinta superficie de absorción, el rendimiento difiere.

A continuación, en la Tabla 11 se muestran los resultados obtenidos para un colector solar con una superficie de absorción de 1,51 m² y un número de tubos de 12. (superficie de tubos de 0,1255 m²)

Tabla 11. Número de tubos vacíos para superficie de absorción de 1,51 m² de colector

MESES	REND. COLECTOR	ÁREA COLECT. AC. LISO	ÁREA COLECT. AC. ALET.	N.º APROX. TUBOS AC.LISO	N.º APROX. TUBOS AC.ALET
ENERO	0,251	6,179	5,739	50	46
FEBRERO	0,310	3,787	3,517	31	28
MARZO	0,341	2,622	2,435	21	20
ABRIL	0,366	2,035	1,890	17	15
MAYO	0,404	1,449	1,346	12	11
JUNIO	0,426	1,208	1,122	10	9
JULIO	0,435	1,228	1,141	10	9
AGOSTO	0,435	1,349	1,253	11	10
SEPTIEMBRE	0,405	1,859	1,726	15	14
OCTUBRE	0,367	2,579	2,395	21	19
NOVIEMBRE	0,298	4,803	4,461	39	36
DICIEMBRE	0,257	6,376	5,921	51	48

En la Tabla 12 se observan los resultados obtenidos para un captador solar de superficie de absorción de 1,25 m² con 10 tubos de vacío de superficie 0,125 m².

Tabla 12. Número de colectores para superficie absorción de 1,25 m²

MESES	REND. COLECTOR	ÁREA COLECT. AC. LISO	ÁREA COLECT. AC. ALET.	N.º APROX. TUBOS AC.LISO	N.º APROX. TUBOS AC.ALET
ENERO	0,203	7,653	7,107	61	57

Capítulo 9. Conclusiones

FEBRERO	0,276	4,256	3,952	34	32
MARZO	0,311	2,874	2,669	23	22
ABRIL	0,343	2,172	2,017	18	16
MAYO	0,389	1,502	1,395	12	12
JUNIO	0,417	1,234	1,146	10	10
JULIO	0,429	1,247	1,158	10	10
AGOSTO	0,429	1,368	1,271	11	11
SEPTIEMBRE	0,394	1,910	1,773	16	15
OCTUBRE	0,348	2,721	2,527	22	21
NOVIEMBRE	0,268	5,352	4,970	43	40
DICIEMBRE	0,213	7,673	7,126	62	57

No obstante, de haber realizado un cálculo respectivo para todos los meses del año, la instalación va destinada a uso diarios sin manipulación de esta. Por lo tanto, se busca un número de captadores válido para todo el año, es decir, un número de colectores intermedio entre los meses de verano en los que se ha visto que se necesitaba menor superficie de absorción y los meses de invierno que necesitan mayor área. Como resultado a esta reflexión, se opta por un colector de superficie de absorción 3,03 m² compuesto por 24 tubos.

Tras realizar los cálculos necesarios para la obtención de los colectores, no se ha obtenido un ahorro económico significativo entre una instalación compuesta por un acumulador aleteado y uno liso. Dado que para el mes de diciembre la diferencia de tubos entre el acumulador liso y aleteado es solamente de cuatro tubos, siendo este mes el de mayor diferencia de tubo correspondientes. Por este motivo, se ha realizado calculado la energía que se obtendría cada mes del año y la fracción líquida correspondiente para el número de tubos y colectores seleccionados. Los resultados se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados Energía utilizada

MESES	ENERGÍA AC. LISO (KJ)	ENERGÍA AC. ALETEADO (KJ)	F. LÍQUIDA AC. LISO	F. LÍQUIDA AC. ALETEADO
ENERO	4726,490	5089,465	0,391	0,452
FEBRERO	7529,648	8107,895	0,858	0,954
MARZO	10765,950	11592,731	1	1
ABRIL	13787,808	14846,656	1	1
MAYO	19199,842	20674,311	1	1

JUNIO	22938,897	24700,512	1	1
JULIO	22519,857	24249,290	1	1
AGOSTO	20511,829	22087,054	1	1
SEPTIEMBRE	14976,584	16126,725	1	1
OCTUBRE	10884,751	11720,656	1	1
NOVIEMBRE	5972,929	6431,625	0,599	0,675
DICIEMBRE	4573,673	4924,913	0,366	0,424

Se puede observar que los efectos causados empleando un mismo número de captadores solares, permite fundir toda la parafina para las estaciones de primavera, verano y mitad de otoño. El resto de los meses se puede observar que, considerando irradiancias medias, se consigue fundir aproximadamente un 10% más de la parafina empleando el acumulador aleteado.

Como ejemplo, en 2020, se registró que noviembre fue el mes menos soleado en Cartagena con solamente 11 días completamente soleados, en los meses de diciembre y febrero 13 días y, por último, enero con 15 días. (Datos extraídos de [43]). De manera, que estos meses en los que no se alcanza la unidad de fracción líquida, es decir, donde la parafina no llega a fundir completamente, debido a las ventajas proporcionadas por las aletas, el acumulador aleteado funde un 10% más de cantidad de PCM que el acumulador liso. Como se ha visto en el Apartado 7.4, a valores bajos de calor disponible como los que se tendrían en estos meses, el rendimiento del acumulador aleteado serán aproximadamente un 15% superiores a los del acumulador liso.

Adicionalmente, si el proceso de fusión del PCM se tuviera que parar en un momento dado, el acumulador aleteado tendría más energía que el acumulador liso, dado que como se ha visto en el Apartado 7.1, la fusión del PCM en el acumulador aleteado se adelanta una hora respecto al acumulador liso, lo que le permite guardar más energía en un tiempo más breve que el otro acumulador.

Otro aspecto para destacar es el proceso de descarga del acumulador aleteado, puesto que la transferencia de calor se ve mejora con la presencia de aletas, en el proceso de descarga consume menos tiempo permitiendo repetir el proceso de carga con anterioridad respecto al acumulador liso.

No obstante, resulta poco significativo el uso de aletas en la localización de Cartagena. Esto se debe al clima que resulta tener buenas condiciones, es decir, beneficioso, y, por lo tanto, no resultaría económico bajo estas condiciones. En cambio, en localizaciones donde el clima es más desfavorable, sí se vería con mayor efecto la presencia de aletas y, en consecuencia, si sería más rentable.

9. Conclusiones

La principal conclusión es que el objetivo de este TFE de realizar la comparativa de diferentes ensayos en las estaciones de invierno y primavera se ha cumplido con éxito. Como primer paso se ha realizado un control de daños debido a los años de vida de la instalación empleada. En este control, se ha podido observar que la medida de algunos termopares era incorrecta y, el aislamiento de la instalación se encontraba muy deteriorado. Como solución, se han investigado las causas por las que los termopares fallaban y se ha podido recuperar la mayoría de ellos. Dado que un mal aislamiento produce mayor número de pérdidas, se han arreglado las zonas más desgastadas.

En cuanto al procesado de datos, se ha conseguido un script capaz de realizar los cálculos necesarios de manera independiente al número de colectores empleados como, al tipo de acumulador utilizado. Reduciendo de esta manera el tiempo de procesado de los resultados, así como de la elaboración de las gráficas necesarias.

La eficiencia ha sido uno de los éxitos de este trabajo, puesto que se ha realizado un cálculo más riguroso de este parámetro. Se ha considerado una disposición de los colectores en paralelo y, a partir de ahí, se ha ajustado el caudal que circula por cada uno de ellos dependiendo de su estado (activado o apagado). Además, se han calculado las pérdidas de instalación comprobando que el valor de estas equivale a más de la mitad del calor capaz de producir los colectores solares.

Se ha conseguido una tendencia de los rendimientos regulada por el calor disponible, demostrando que, a valores de calor por debajo de 5 kW, el acumulador aleteado se comporta mejor que el acumulador liso, obteniendo rendimientos de valor de 0,5 a 0,6 mientras que, el otro obtiene 0,3 a 0,4. En cambio, a valores por encima de 7 kW, se comportan de la misma manera, proporcionando rendimientos iguales ambos acumulados e inferiores a los que se obtienen en valores de calor entre 5 y 7 kW. Este rango es donde se encuentran los rendimientos óptimos puesto que en ambos acumuladores se obtiene el máximo rendimiento siendo superior el del acumulador aleteado.

También, se ha proporcionado la ecuación que determina esta tendencia, de manera que se puede ajustar el número de colectores para obtener el calor correspondiente al rendimiento óptimo.

Otro aspecto interesante, ha sido la comparativa realizada en la que se ha visto cómo afecta la irradiancia a diferentes parámetros como la fracción líquida, energía almacenada y transferencia de calor (números de Nusselt y Rayleigh). Se ha comprobado que la convección natural tiene mayor efecto en el acumulador liso durante la fusión del PCM, mientras que en el acumulador aleteado la convección natural es menor durante este proceso, debido a una mayor transferencia de calor por conducción gracias al área aportada por las aletas.

Por último, se ha llevado a cabo un estudio de los beneficios de superficies aleteadas en el que se ha considerado nulas las pérdidas derivadas de un mal aislamiento en las tuberías o en la instrumentación. El resultado obtenido en cuanto a los captadores solares para una instalación apta para todo el año, ha sido de un colector de superficie de absorción de 3,03 m² para ambos acumuladores. En cambio, se ha demostrado que, en meses de invierno, donde la irradiancia que se puede obtener es menor que en el resto de los meses, el acumulador aleteado consigue fundir el PCM un 10% más que el liso.

Por lo tanto, se ha evaluado que, en climas cálidos con mayoría de días claros, como el de la ciudad de Cartagena, la adición de aletas no afecta tanto como se esperaba, pero en climas más desfavorable sí sería un factor mejorable.

No obstante, se ha visto las ventajas de las aletas en el almacenamiento de energía. Debido a que la instalación es dependiente de la irradiancia y algunas veces se encuentra afectada por la presencia de nubes, en los días en los que ocurra esto, la energía almacenada por el acumulador aleteado será superior a la del liso debido a que la fusión del PCM en este. A modo de ejemplo, en ensayo mostrado en el Apartado 7.1., se observa que la energía almacenada para el acumulador aleteado asciende a 2 kWh mientras que para el acumulador liso será de 0,7 kWh a las 13:00 h.

En futuras líneas de investigación a este trabajo, se podría realizar un mejor aislamiento. Como se ha podido observar, las pérdidas corresponden a más del 50% del calor obtenido por los colectores. Se necesitaría menor número de colectores si las pérdidas fueran menores y por lo tanto supondría un ahorro económico.

Un estudio de las pérdidas de la instalación también sería interesante, puesto que permitiría mediante unos cálculos previos al ensayo, estimar el volumen de pérdidas que se podría dar. De esta manera, se podría trabajar siempre en la zona óptima de los rendimientos, obteniendo así el máximo de estos.

También se podría implantar un controlador de temperatura en el sistema. Como se ha podido observar mediante la realización de los ensayos, varios ensayos han sido fallidos debido a no alcanzar la temperatura de fusión, alcanzar la temperatura que puede dañar el PCM o por fallo en la instrumentación. Mediante un controlador de temperatura se pueden reducir las posibilidades de dañar la parafina por temperaturas superiores a 99 °C y parar el ensayo cuando no se alcance la temperatura mínima de fusión.

Además, puesto que se conocen los instrumentos que suelen fallar se podría implantar otro controlador de los instrumentos que también parase el ensayo en caso de que falle alguno de estos. Como resultado a lo comentado conseguiríamos una instalación totalmente independiente y más aproximada al propósito de esta instalación para el cual debería ser lo más automática posible.

Se sugiere también un estudio de la descarga para ambos acumuladores puesto que se puede dar como necesidad una descarga rápida para el uso diario de la instalación. Convendría comparar el tiempo de descarga de ambos puesto que sería una ventaja en la toma de decisión de rentabilidad de un acumulador u otro.

Continuar la línea de investigación comenzada durante el trabajo fin de master de Domingo Fernández [13] permitiría conocer de forma más exacta el comportamiento del acumulador liso.

Capítulo 9. Conclusiones

Además, dicha investigación también sería de gran interés en el acumulador aleteado permitiendo también comparar con el otro acumulador.

Por último, se podría continuar esta línea de investigación con el fin de obtener una curva más exacta del comportamiento del rendimiento según el calor captado mediante la realización de ensayo en otras estaciones del año. Además, también sería interesante continuar el estudio de los beneficios de superficies aleteadas en LTES tanto para los acumuladores liso y aleteado como para los otros dos acumuladores de los que se dispone también en la instalación.

10. Bibliografía

- [1] European Comission, “Marco sobre clima y energía para 2030 | Acción por el Clima.” https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_es#tab-0-0 (accessed Jun. 12, 2021).
- [2] “Red Electrical.” <https://redelectrical.co.uk/self-consumption-of-solar-pv-yields/>.
- [3] H. Zhang, J. Baeyens, G. Cáceres, J. Degrève, and Y. Lv, “Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 53, pp. 1–40, 2016, doi: 10.1016/j.pecs.2015.10.003.
- [4] A. Egea, “Diseño, construcción y ensayo de un sistema de acumulación de calor latente de origen solar térmico basado en el empleo de espumas metálicas de aluminio,” Universidad Politécnica de Cartagena, 2020.
- [5] X. Chen *et al.*, “Toward Tailoring Chemistry of Silica-Based Phase Change Materials for Thermal Energy Storage,” *iScience*, vol. 23, no. 10, p. 101606, 2020, doi: 10.1016/j.isci.2020.101606.
- [6] E. Oró, E. de Jong, and L. F. Cabeza, “Experimental analysis of a car incorporating phase change material,” *J. Energy Storage*, vol. 7, pp. 131–135, 2016, doi: 10.1016/j.est.2016.05.003.
- [7] R. A. Kishore, M. V. A. Bianchi, C. Booten, J. Vidal, and R. Jackson, “Parametric and sensitivity analysis of a PCM-integrated wall for optimal thermal load modulation in lightweight buildings,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 187, no. January, p. 116568, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116568.
- [8] Y. Qu, D. Zhou, F. Xue, and L. Cui, “Multi-factor analysis on thermal comfort and energy saving potential for PCM-integrated buildings in summer,” *Energy Build.*, vol. 241, 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.110966.
- [9] D. Alexander and L. Skaug, “BACHELOR ’ S THESIS Phase change materials for thermal energy storage,” 2018.
- [10] M. Belmonte, “Universidad politécnica de cartagena,” Universidad Politécnica de Cartagena, 2019.
- [11] A. Zamora, “Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial Diseño de una instalación solar térmica para el abastecimiento energético de acumuladores de calor latente de tipo PCM,” Universidad Politécnica de Cartagena, 2019.
- [12] F. García Bermejo, “Modelización del proceso de acumulación de energía solar térmica usando materiales de cambio de fase,” Universidad Politécnica de Cartagena, 2011.
- [13] D. Fernández Esquiva, “Estudio de la transferencia de calor mediante convección natural durante la fusión de materiales de cambio de fase,” Universidad Politécnica de Cartagena, 2020.

- [14] V. Lorente López, "Estudio experimental sobre el almacenamiento de energía solar en intercambiadores de cambio de fase mejorados," 2020.
- [15] C. Zhao *et al.*, "Simulations of melting performance enhancement for a PCM embedded in metal periodic structures," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 168, p. 120853, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120853.
- [16] Y. Wang, X. Y. Hui, X. X. Meng, and Z. G. Jin, "Evaluation and optimization of melting performance of latent thermal s," *J. Energy Storage*, vol. 30, no. February, p. 101423, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101423.
- [17] L. Zhang *et al.*, "Construction of 3D interconnected diamond networks in Al-matrix composite for high-efficiency thermal management," *Chem. Eng. J.*, vol. 380, no. August 2019, 2020, doi: 10.1016/j.cej.2019.122551.
- [18] R. Cozzolino, D. Chiappini, and G. Bella, "Experimental characterisation of a novel thermal energy storage based on open-cell copper foams immersed in organic phase change material," *Energy Convers. Manag.*, vol. 200, no. September, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.112101.
- [19] S. Zhang and Z. Wang, "Thermodynamics behavior of phase change latent heat materials in micro-/nanoconfined spaces for thermal storage and applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. August 2017, pp. 2319–2331, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.08.080.
- [20] W. Li, X. X. Zhang, X. C. Wang, and J. J. Niu, "Preparation and characterization of microencapsulated phase change material with low remnant formaldehyde content," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 106, no. 2–3, pp. 437–442, 2007, doi: 10.1016/j.matchemphys.2007.06.030.
- [21] M. Medrano, M. O. Yilmaz, M. Nogués, I. Martorell, J. Roca, and L. F. Cabeza, "Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage systems," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 10, pp. 2047–2055, 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.01.014.
- [22] W. Zhao, D. M. France, W. Yu, T. Kim, and D. Singh, "Phase change material with graphite foam for applications in high-temperature latent heat storage systems of concentrated solar power plants," *Renew. Energy*, vol. 69, pp. 134–146, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2014.03.031.
- [23] A. Gil, G. Peiró, E. Oró, and L. F. Cabeza, "Experimental analysis of the effective thermal conductivity enhancement of PCM using finned tubes in high temperature bulk tanks," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 142, no. November 2017, pp. 736–744, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.07.029.
- [24] M. Lissner, J. Tissot, D. Leducq, K. Azzouz, and L. Fournaison, "Performance study of latent heat accumulators: Numerical and experimental study," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 102, pp. 604–614, 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.011.
- [25] P. Chen, X. Gao, Y. Wang, T. Xu, Y. Fang, and Z. Zhang, "Metal foam embedded in SEBS/paraffin/HDPE form-stable PCMs for thermal energy storage," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 149, pp. 60–65, 2016, doi: 10.1016/j.solmat.2015.12.041.
- [26] Y. Xu, Q. Ren, Z. J. Zheng, and Y. L. He, "Evaluation and optimization of melting performance for a latent heat thermal energy storage unit partially filled with porous media," *Appl. Energy*, vol. 193, pp. 84–95, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.02.019.

Capítulo 10. Bibliografía.

- [27] A. A. Al-Abidi, S. Mat, K. Sopian, M. Y. Sulaiman, and A. T. Mohammad, "Numerical study of PCM solidification in a triplex tube heat exchanger with internal and external fins," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 61, no. 1, pp. 684–695, 2013, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.02.030.
- [28] A. A. Al-Abidi, S. Mat, K. Sopian, M. Y. Sulaiman, and A. T. Mohammad, "Experimental study of melting and solidification of PCM in a triplex tube heat exchanger with fins," *Energy Build.*, vol. 68, no. PARTA, pp. 33–41, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.09.007.
- [29] A. Raul, S. K. Saha, and M. Jain, "Transient performance analysis of concentrating solar thermal power plant with finned latent heat thermal energy storage," *Renew. Energy*, vol. 145, pp. 1957–1971, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.07.117.
- [30] S. Zhang, L. Pu, L. Xu, R. Liu, and Y. Li, "Melting performance analysis of phase change materials in different finned thermal energy storage," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 176, no. April, p. 115425, 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115425.
- [31] X. Q. Zhai, X. W. Cheng, C. Wang, and R. Z. Wang, "Experimental investigation and performance analysis of a fin tube phase change cold storage unit for high temperature cooling application," *Energy Build.*, vol. 89, pp. 9–17, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.12.021.
- [32] B. Cárdenas and N. León, "High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 27, pp. 724–737, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.07.028.
- [33] M. E. Zayed *et al.*, "Applications of cascaded phase change materials in solar water collector storage tanks: A review," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 199, no. December 2018, pp. 24–49, 2019, doi: 10.1016/j.solmat.2019.04.018.
- [34] M. Abdelgaied, Y. Zakaria, A. E. Kabeel, and F. A. Essa, "Improving the tubular solar still performance using square and circular hollow fins with phase change materials," *J. Energy Storage*, vol. 38, no. April 2020, p. 102564, 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102564.
- [35] UNE, "UNE Normalización Española," *Une 500540:2004*, 2004. <https://www.une.org/>.
- [36] S. Standard, "Class A Spectrally Flat (Secondary Standard) Pyranometer Model GEO-SR20," no. 5, pp. 7–8.
- [37] J. A. Cros, "Escuela Técnica Superior de Ingeniería Caracterización de un sistema de almacenamiento latente pasivo mejorado," Universidad Politécnica de Cartagena, 2021.
- [38] M. C. Meizoso, "Distribución de la Irradiación Solar Global, Directa y Difusa, en la Ciudad de A Coruña," 2012.
- [39] "Sunrise and Sunset." <https://www.sunrise-and-sunset.com>.
- [40] NASA, "701Cd80Ae125B4Be747B405a6Fbdfc4Af8E4165B @ Power.Larc.Nasa.Gov." <https://power.larc.nasa.gov>.
- [41] J. F. Díaz, "Eficiencia Energética y Utopía." [Online]. Available: <https://juanfrancisco207.wordpress.com>.
- [42] Viesmann, "Panel solar de tubos de vacío Vitosol 300-TM Datos técnicos." 2017.
- [43] "Hikersbay." <http://hikersbay.com/climate>.